



TESIS - EE185401

DESAIN SISTEM SENSOR NDIR UNTUK MENDETEKSI GAS CO DAN NO BERKONSENTRASI RENDAH

REZA DIHARJA
071116500402003

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Dr. Ir. Totok Mujiono, M.Ikom.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK ELEKTRONIKA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



TESIS - EE185401

**DESAIN SISTEM SENSOR NDIR UNTUK
MENDETEKSI GAS CO DAN NO BERKONSENTRASI
RENDAH**

REZA DIHARJA
071116500402003

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Dr. Ir. Totok Mujiono, M.Ikom.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK ELEKTRONIKA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
oleh:

Reza Diharja
NRP. 07111650040203

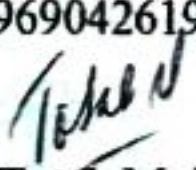
Tanggal Ujian : 20 Desember 2018
Periode Wisuda : Maret 2019

Disetujui oleh:

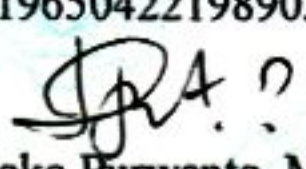


1. Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
NIP: 196904261994031003

(Pembimbing I)


2. Dr. Ir. Totok Mutiono, M.Ikom
NIP: 196504221989031001

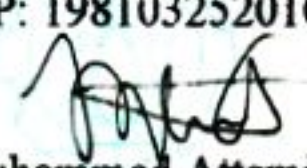
(Pembimbing II)


3. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng., Ph.D.
NIP: 196512111990021002

(Penguji)


4. Astria Nur Irfansyah, ST., M.Eng., Ph.D
NIP: 198103252010121002

(Penguji)


5. Muhammad Attamimi, B.Eng., M.Eng., Ph.D
NRP: 1985201711039

(Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Elektro


Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“DESAIN SISTEM SENSOR NDIR UNTUK MENDETEKSI GAS CO DAN NO BERKONSENTRASI RENDAH”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2018



Reza Diharja

07111650040203

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN SISTEM SENSOR NDIR UNTUK MENDETEKSI GAS CO DAN NO BERKONSENTRASI RENDAH

Nama mahasiswa : Reza Diharja
NRP : 071116500402003
Pembimbing : 1. Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
2. Dr. Ir. Totok Mujiono, M.Ikom.

ABSTRAK

Emisi gas buang dihasilkan oleh mesin berbahan bakar bensin maupun solar/diesel. Contoh gas yang berasal dari emisi mesin kendaraan bermotor adalah gas CO (karbon monoksida) dan NO (nitrogen oksida). Pada kondisi tertentu, dua macam gas tersebut mampu memberikan efek negatif bagi kesehatan manusia sedangkan jika terpapar lebih banyak lagi, dapat menyebabkan kematian. Pada penelitian ini telah dibuat sistem sensor NDIR (*non dispersive infrared*) yang digunakan sebagai pengukur dan pendeteksi gas CO dan NO konsentrasi rendah. Sensor NDIR terdiri dari lampu pijar sebagai sumber sinar inframerah, ruang sampel, detektor termopile dan filter optik berbasis interferometrik yang digunakan sebagai *band-pass* filter sesuai dengan karakteristik gas CO dan NO di spektrum sinar inframerah. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini menunjukkan bahwa sistem sensor NDIR dapat digunakan untuk pengujian pendeteksian senyawa gas CO dan NO. Pengujian langsung sensor NDIR menggunakan sampel gas yang berasal dari asap mesin bensin memperlihatkan penurunan tegangan termopile A2 pada rentang volume 40 – 60 ml. Sedangkan respon tegangan termopile A1 terhadap sampel gas yang berasal dari asap mesin diesel adalah turun pada rentang volume 80 – 120 ml. Dengan memperbesar kuantitas sampel gas asap mesin bensin, tegangan luaran rata-rata yang didapatkan untuk masing-masing termopile A1 (755,14mV) dan termopile A2 (1208,32mV). Keduanya memiliki nilai lebih kecil daripada ketika dilewati udara bersih yakni 757,16 mV dan 1213,72 mV. Penguat *lock-in* diterapkan untuk mengatasi adanya gangguan derau berfrekuensi rendah. Respon luaran detektor termopile sebelum dan setelah menggunakan penguat *lock-in* adalah identik bila mereferensikan terhadap nilai frekuensi. Tampilan GUI sebagai antarmuka manusia-mesin bertujuan untuk menampilkan respon detektor termopile ketika diujicobakan dengan udara bersih maupun sampel gas yang mengandung senyawa gas CO maupun NO. Terdapat indikator pendeteksian pada GUI yang bertujuan untuk memberitahu apakah gas CO maupun NO terdeteksi atau tidak.

Kata kunci: Karbon Monoksida, Nitrogen Oksida, NDIR, Filter Optik, Penguat *Lock-in*

Halaman ini sengaja dikosongkan

NDIR SENSOR SYSTEM DESIGN FOR CO AND NO GAS DETECTION AT LOW CONCENTRATION

By : Reza Diharja
Student Identity Number : 071116500402003
Supervisor(s) : 1. Dr. Muhammad Rivai ST., MT
2. Dr. Ir. Totok Mujiono M.Ikom

ABSTRACT

Exhaust-gas emission is produced by gasoline and/ or diesel engines. Carbon monoxide and nitrogen oxide are two compounds that come from exhaust-gas emission. At certain level, two kinds of those gases are able to give a bad influence for human health. But, if somebody has exposed with high level concentration, it could be dangerous and towards to death problem. In this research, an NDIR sensor system for CO and NO gases detection at low concentration has been developed and built. NDIR sensor system consists of incandescent lamp as infrared light source, sample chamber, thermopile detectors and optical band-pass filters that appropriate with CO and NO gas characteristics. The resulting data of this experiment shows that NDIR sensor system is able to detect CO and NO gas compounds. Direct testing of NDIR sensor to the target gases shows that output voltage of thermopile A2 is declined for 40 - 60 ml range of gasoline gas volume. On the other hand, output voltage of thermopile A1 is declined for 80-120ml range of diesel gas volume. By increasing the quantity of gas volume, output voltage of thermopile A1 is 755,14mV and 1208,32 mV for thermopile A2. Both of the outputs have values below the output voltage when flowing clean air that have 757,16mV and 1213,72mV each. A lock-in amplifier is implemented to overcome a low-frequency noise problem. The output responses of thermopile detectors have an identical properties regarding to its frequency range of value. A GUI is built for human-machine interface and is subjected for showing the data values of thermopile responses when it used neither for gas CO and NO detection or flowing a clean air. There are indicators of CO and NO detection on the main page of GUI. indicators are subjected to notice whether CO and/or NO gas is detected or not.

Key words: Carbon monoxide, nitrogen oxide, NDIR, lock-in amplifier

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang dengan izin-Nya tesis kuliah Program Pascasarjana Teknik Elektro ITS ini selesai dibuat. Penulis berharap agar hasil penelitian ini bermanfaat dan dapat digunakan oleh mahasiswa Program Pascasarjana Teknik Elektro dalam penulisan buku tesis maupun bagi masyarakat umum yang membutuhkannya.

Selama penelitian dan penyusunan tesis ini, penulis banyak mendapatkan pelajaran tentang kesabaran, ketelitian, kecermatan hingga kreativitas. Adapun dalam pelaksanaannya di lapangan, banyak sekali arahan dan masukan yang penulis dapatkan dari berbagai pihak. Dengan demikian, perkenankan penulis untuk menyampaikan rasa terimakasih kepada:

1. Dr. Muhammad Rivai, ST., MT dan Dr. Ir. Totok Mujiono, M.Ikom sebagai Pembimbing Tesis yang telah banyak memberikan saran, bantuan dan bimbingan selama penelitian berlangsung.
2. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng., Ph.D. , Astria Nur Irfansyah, ST., M.Eng., Ph.D dan Muhammad Attamimi, B.Eng., M.Eng., Ph.D sebagai Penguji Tesis yang telah membantu penyempurnaan buku tesis ini.
3. Kedua orangtua yang sentiasa mendukung dan mendoakan penulis untuk menyelesaikan tesis dan perkuliahan.
4. Istri dan keluarga yang ikut mendoakan, mendukung dan menyemangati agar perkuliahan segera selesai.
5. Teman-teman seangkatan dan teman-teman Lab B402-403 yang ikut membantu menyelesaikan masalah selama perkuliahan dan penelitian.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna. Namun penulis tetap membuka diri jika ada kritik dan saran dari para pembaca yang membangun untuk penelitian ini kedepannya.

Surabaya, 12 Desember 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Kontribusi	2
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	6
2.2 Sensor NDIR	8
2.2.1 Sumber Sinar Inframerah	11
2.2.2 Detektor Sinar Inframerah	12
2.3 Karakteristik Gas CO dan NO di Spektrum Sinar Inframerah	15
2.4 Filter Optik	17
2.4.1 Fabry-Perot Interferometer	17
2.4.2 Filter <i>Dichroic</i>	21
2.5 Sistem Pengolah Data	22
2.5.1 Konsep Rangkaian Penguat <i>Lock-In</i>	23
2.5.2 Mikrokontroler	27
BAB 3 METODE PENELITIAN	29
3.1 Sistem Sensor NDIR	30
3.2 Perancangan Perangkat Keras dan Program Komputasi Sistem Sensor NDIR	35
3.2.1 Sensor NDIR	35
3.2.2 Sumber Daya Lampu Menggunakan Sumber Arus	37
3.2.3 Sistem Pengolah Data	37

3.3	Proses Pengujian Sistem Sensor NDIR dan Pengambilan Data.....	39
3.3.1	Proses Pengambilan Gas untuk Pengujian	39
3.3.2	Pengujian Sumber Daya untuk Sumber Sinar Inframerah.....	40
3.3.3	Pengujian Sensor NDIR dengan Penguat <i>Non-Inverting</i>	41
3.3.4	Pengujian Sensor NDIR dengan Penguat <i>Lock-in</i>	42
3.4	Analisis Data Hasil Pengujian	42
3.5	Penulisan Laporan	42
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		43
4.1	Sumber Daya untuk Lampu Pijar	43
4.2	Karakteristik Umum Detektor Termopile	45
4.3	Pengujian Sensor NDIR Dengan Sampel Gas Mengandung Senyawa CO dan NO	47
4.3.1	Pengujian Sensor NDIR Dengan Sampel Gas Kuantitas Besar	49
4.4	Pengujian Sistem Sensor NDIR Dengan Penguat <i>Lock-in</i>	50
4.4.1	Simulasi Penguat <i>Lock-in</i> Menggunakan Matlab	51
4.4.2	Penguat <i>Lock-in</i> Pada Sistem Sensor NDIR.....	55
4.4.3	Penerapan Penguat <i>Lock-in</i> Pada Sistem Sensor NDIR	57
4.5	Pendeteksian Gas CO dan NO Menggunakan Sistem Sensor NDIR	58
4.5.1	Pendeteksian Menggunakan Sampel Gas Asap Mesin Bensin.....	59
4.5.2	Pendeteksian Menggunakan Sampel Gas Asap Mesin Diesel.....	65
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		73
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN		79
BIOGRAFI PENULIS		91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pita Serapan Energi dari Uap Etanol, Dinitrogen Monoksida, Metana dan Karbon Dioksida	9
Gambar 2.2 Bagian Utama Pada Sensor NDIR	10
Gambar 2.3 Grafik Kerapatan Daya Per Satuan Luas Terhadap Panjang Gelombang Cahaya pada Hukum Pergeseran Wien	12
Gambar 2.4 Skematik Detektor Termopile untuk Mengukur Intensitas Sinar Inframerah	13
Gambar 2.5 Bidang Pandang Pada Detektor.....	15
Gambar 2.6 Spektrum Serapan Gas CO Pada Panjang Gelombang Sinar Inframerah MIR	16
Gambar 2.7 Spektrum Serapan Gas NO Pada Panjang Gelombang Sinar Inframerah MIR	17
Gambar 2.8 Fabry-Perot Etalon	18
Gambar 2.9 (A) Sinar Dipantulkan dari Lapisan Permukaan Atas dan Bawah Film Membentuk Pola Kisi-Kisi. (B) Pola Kisi-Kisi yang Terbentuk dari Perbedaan Sudut Inklinasi.....	20
Gambar 2.10 Filter <i>Dichroic</i>	22
Gambar 2.11 Blok Diagram Penguat <i>Lock-in</i>	25
Gambar 2.12 Skematik Rangkaian pada Sistem Penguat <i>Lock-in</i> , Penguat Tingkat Pertama, IC Penguat <i>Lock-in</i> dan Sistem Filter Tahap Akhir	25
Gambar 2.13 Blok Diagram Rangkaian Penguat <i>Lock-in</i>	26
Gambar 2.14 Modul Mikrokontroler Arduino Due	27
Gambar 3.1 Langkah-langkah Tahapan Penelitian	30
Gambar 3.2 Tahapan Pengujian Gas CO dan NO Menggunakan Sistem Sensor NDIR.....	31
Gambar 3.3 Desain Sistem Sensor NDIR	31
Gambar 3.4 Aktualisasi Desain Sistem Sensor NDIR	31
Gambar 3.5 Tampilan Tab Utama pada GUI yang Digunakan.....	34
Gambar 3.6 Tampilan Tab <i>COM Port Setting</i> pada GUI yang Digunakan	35
Gambar 3.7 Skematik Rancangan Desain Sensor NDIR	36
Gambar 3.8 (A) Lampu yang Digunakan Sebagai Sumber Cahaya Inframerah. (B) Filter Optik Sesuai Karakteristik Gas CO dan NO	36
Gambar 3.9 Rangkaian Sumber Daya untuk Sumber Sinar Inframerah	37
Gambar 3.10 Rangkaian Penguat <i>Non-Inverting</i>	38
Gambar 3.11 Rancangan Rangkaian Penguat <i>Lock-in</i> yang akan diterapkan di Arduino DUE.....	39
Gambar 3.12 Langkah-langkah Pengambilan Gas.....	40
Gambar 3.13 (A) Tempat penyimpanan gas sementara. (B) Selang Berbentuk Tabung Dilengkapi dengan Filter Kertas Tisu.....	40
Gambar 3.14 Karakteristik Umum Responsivitas Berbagai Macam Fotodioda Planar Terdifusi Terhadap Panjang Gelombang.....	41
Gambar 4.1 Respon Vout Photodioda Dengan Sumber Daya Lampu Menggunakan Sumber Tegangan (<i>Voltage Source</i>)	43

Gambar 4.2 Respon Vout Photodiode Dengan Sumber Daya Lampu Menggunakan Sumber Arus (<i>Current Source</i>)	44
Gambar 4.3 Resistansi vs Temperatur pada Thermistor	46
Gambar 4.4 Respon Detektor Termopile A2 Pada Sensor NDIR	47
Gambar 4.5 Respon Detektor Termopile A1 Pada Sensor NDIR	48
Gambar 4.6 Simulasi Modulasi Frekuensi Sinyal Pesan dengan Sinyal Pembawa Berfrekuensi Lebih Tinggi	52
Gambar 4.7 (A) Hasil <i>Mixing</i> Sinyal Kotak dengan Frekuensi 1Hz dan 100Hz dan (B) <i>Mixing</i> dengan Frekuensi 50Hz dan 1000Hz.....	53
Gambar 4.8 Hasil <i>Mixing</i> Sinyal Sinus dengan Frekuensi 50Hz dan 1kHz	53
Gambar 4.9 (A) Luaran Hasil Penguat <i>Lock-in</i> dan (B) Hasil <i>Mixing</i> Antara 2 Sinyal Kotak Frekuensi Berbeda Ditambah Derau	54
Gambar 4.10 Hasil Penyaringan dengan LPF Mode Butterworth.....	55
Gambar 4.11 Sinyal Kotak yang Digunakan untuk <i>Mixing</i>	56
Gambar 4.12 (A) Respon Detektor Untuk Gas NO dan (B) Respon Detektor Untuk Gas CO	58
Gambar 4.13 Rekam Awal Ketika Dilewati Udara Bersih.....	59
Gambar 4.14 Rekam Kedua Ketika Dilewati Udara Bersih.....	60
Gambar 4.15 Rekam Ketiga Ketika Dilewati Udara Bersih.....	60
Gambar 4.16 Rekam Pertama Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Asap Mesin Bensin.....	62
Gambar 4.17 Tampilan GUI pada Rekam Kedua	62
Gambar 4.18 Tampilan GUI pada Rekam Ketiga	63
Gambar 4.19 Tampilan GUI pada Rekam Keempat.....	63
Gambar 4.20 Rekam Awal Ketika Dilewati Udara Bersih.....	65
Gambar 4.21 Rekam Kedua Ketika Dilewati Udara Bersih.....	66
Gambar 4.22 Rekam Ketiga Ketika Dilewati Udara Bersih.....	66
Gambar 4.23 Rekam Keempat Ketika Dilewati Udara Bersih.....	67
Gambar 4.24 Rekam Pertama Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Asap Mesin Diesel.....	68
Gambar 4.25 Tampilan GUI pada Rekam Kedua.....	68
Gambar 4.26 Tampilan GUI pada Rekam Ketiga	69
Gambar 4.27 Tampilan GUI pada Rekam Keempat.....	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Dasar Detektor Termopile	14
Tabel 4.1 Respon Detektor Termopile Ketika Dialirkan Udara Bersih.....	47
Tabel 4.2 Data Pengujian Sensor NDIR Menggunakan Sampel dari Asap Mesin Bensin	49
Tabel 4.3 Data Pengujian Sensor NDIR Menggunakan Sampel dari Asap Mesin Diesel.....	50
Tabel 4.4 Ringkasan Data Rekam Ketika Dilewati Udara Bersih	61
Tabel 4.5 Ringkasan Data Rekam Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Mesin Bensin	64
Tabel 4.6 Ringkasan Indikator Pendeteksian gas CO dan NO Menggunakan Sampel Gas Dari Mesin Bensin.....	64
Tabel 4.7 Ringkasan Data Rekam Ketika Dilewati Oleh Udara Bersih	67
Tabel 4.8 Ringkasan Data Rekam Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Mesin Diesel.....	70
Tabel 4.9 Ringkasan Indikator Pendeteksian gas CO dan NO Menggunakan Sampel Gas Dari Mesin Diesel.....	70

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gas CO (karbon monoksida) dan NO (nitrogen monoksida) merupakan contoh dari gas-gas polutan yang jumlah dan keberadaannya perlu perhatian serius. Oleh karena mereka menjadi pembicaraan utama dalam diskusi mengenai perubahan iklim, baik pada skala global maupun lokal [1]. Selain itu permasalahan kesehatan pada sistem pernapasan manusia dapat diketahui dari keberadaan gas-gas tersebut.

Tingkat kesehatan sistem pernapasan manusia berkaitan dengan konsentrasi gas-gas CO dan NO pada level tertentu, umumnya pada satuan per semilyar (ppb). Khusus pada bidang kedokteran/medis, gas NO (*exhaled* NO atau eNO) yang berasal dari respirasi manusia dapat dimanfaatkan untuk mengetahui apakah seseorang mengidap penyakit asma atau tidak. Pada kasus ini, gas NO dihasilkan oleh sel jenis tertentu yang menyebabkan respon peradangan. Seseorang dengan riwayat memiliki penyakit asma pada saat yang sama memiliki kadar gas respirasi NO yang tinggi.

Penelitian ini ingin mengembangkan suatu teknik alternatif lain untuk sistem sensor NDIR yang selektif terhadap gas karbon monoksida dan nitrogen monoksida berkonsentrasi rendah (ppb). Pada penelitian yang dilakukan oleh [2], mereka telah melakukan pengujian terhadap gas-gas karbon seperti CO₂, CH₄, CO, C₂H₂, C₂H₄ and C₂H₆. Selain itu penelitian yang dilakukan oleh [3] mengkhususkan pengujian terhadap sampel gas karbon hasil respirasi manusia dan penelitian [1] telah berhasil mendeteksi keberadaan gas NO₂ dan NO dengan konsentrasi tertentu.

Permasalahan yang ikut menjadi perhatian adalah tentang masalah biaya pengoperasian, kemudahan akses pengoperasian dan kehandalan alat yang dirancang. Setelah berbagai macam referensi yang digunakan untuk mendukung penelitian terkumpul, harapan selanjutnya adalah implementasi teori hasil dari referensi untuk diwujudkan dalam bentuk sistem sensor NDIR yang dapat bekerja sesuai dengan ekspektasi.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin diselesaikan di penelitian ini antara lain adalah:

1. Bagaimana menyusun rancangan dan membangun sebuah sistem sensor NDIR untuk pendeteksian gas CO dan NO
2. Bagaimana caranya untuk mendeteksi gas CO dan NO berkonsentrasi rendah
3. Bagaimana supaya mendapatkan sensor gas yang selektif
4. Bagaimana sistem sensor bisa menghasilkan sinyal yang terukur dalam derau (*noise*) yang besar

1.3 Tujuan

Penelitian ini memiliki tujuan di antaranya berupa:

1. Perancangan sistem sensor gas CO dan NO terdiri dari sistem-sistem kecil pendukungnya.
2. Perancangan dan pembuatan sistem sensor gas CO dan NO berbasis NDIR (*Non-Dispersive Infrared*).
3. Penggunaan filter optik berbasis interferometer.
4. Penggunaan penguat *lock-in* untuk menaikkan nilai SNR (*Signal to Noise Ratio*).

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi oleh masalah antara lain adalah:

1. Sampel gas yang digunakan untuk pengujian dan pendeteksian gas CO dan NO berasal dari sumber tertentu yang terpilih.
2. Sistem pengolah data yang dipakai disesuaikan dengan kebutuhan penelitian.

1.5 Kontribusi

Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah terbentuknya sebuah sistem sensor gas NDIR yang dapat mendeteksi gas CO dan NO berkonsentrasi

rendah dengan menerapkan penguat *lock-in* berbasis digital pada sistem sensor. Dengan menggunakan sumber gas sampel yang berasal dari hasil respirasi, diharapkan dapat membantu manusia apakah mengidap penyakit asma atau tidak. Selain itu, sistem sensor NDIR diharapkan dapat membantu memonitor tingkat konsentrasi gas CO dan NO di lingkungan yang ingin dideteksi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Udara merupakan salah satu sumber daya alam yang memiliki peran penting bagi kehidupan manusia serta makhluk hidup lainnya. Seiring dengan meningkatnya aktivitas manusia, udara menjadi tercemar terutama akibat peningkatan emisi kendaraan bermotor. Di Indonesia, polusi udara yang disebabkan oleh emisi gas buang kendaraan bermotor mencapai 70-80 % dari total polusi yang dihasilkan. Peningkatan jumlah kendaraan bermotor yang signifikan secara langsung meningkatkan emisi gas buang sehingga kadar gas pencemar udara ikut meningkat, seperti karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) [4]. Kendaraan yang dipakai sebagai alat transportasi darat, menjadi penyumbang utama polusi udara bersifat karsinogenik dan mutagenik yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia [5].

Gas CO (karbon monoksida) dan NO (nitrogen monoksida) merupakan contoh dari gas-gas polutan yang jumlah dan keberadaannya perlu perhatian serius. Pentingnya perhatian dikarenakan menjadi pembicaraan utama dalam diskusi mengenai perubahan iklim, baik pada skala global maupun lokal [1] dan menjadi masalah isu sosial di masyarakat [6]. Selain itu, terdapat studi yang meneliti tentang hubungan antara gas CO dengan tingkatan level kesehatan manusia dan kesehatan masyarakat. Pada konsentrasi 24 ppm, gas CO dapat menyebabkan keracunan hingga mati lemas karena kekurangan napas [7]. Badan kesehatan dunia PBB (WHO) mengeluarkan aturan yang menjadi batasan tingkatan gas CO di udara untuk membatasi konsentrasi gas CO di dalam hemoglobin darah COHb meningkat hingga lebih dari 2,5% seperti di bawah ini [8]:

- a. 100 mg/m³ (87,1 ppm) dalam waktu 15 menit
- b. 60 mg/m³ (52,3 ppm) dalam waktu 30 menit
- c. 30 mg/m³ (26,1 ppm) dalam waktu 1 jam
- d. 10 mg/m³ (8,7 ppm) dalam waktu 8 jam

Gas berbahaya lainnya adalah oksida dari gas nitrogen, yakni nitrogen monoksida (NO). Gas ini terdapat di udara bebas dan sebagian besar dihasilkan oleh mesin kendaraan dan alat masak rumah. Pada satu kondisi tertentu, gas NO perlu perhatian serius karena memiliki potensi yang berbahaya dan mematikan sebagai zat pencemar [9]. Gas NO akan jauh lebih berbahaya jika terlepas ke udara karena dapat bereaksi dengan oksigen dan berubah menjadi gas nitrogen dioksida.

Batasan paparan (*exposure*) gas NO yang diperbolehkan menurut standar OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) adalah 25 ppm gas NO pada nilai rata-rata di atas waktu pergantian kerja selama 8 jam. Standar nilai tersebut juga dapat diartikan sebagai 30 mg gas NO per 1 kubik udara (mg/m^3). Sedangkan NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) telah merekomendasikan batas paparan gas CO adalah 25 ppm ($30 \text{ mg}/\text{m}^3$) rata-rata di atas waktu pergantian kerja selama 10 jam per hari atau 40 jam per minggu.

Buku tesis ini disusun sebagai laporan penelitian dari sistem sensor yang dapat mendeteksi gas CO dan NO dengan menggunakan konsep spektrometer sinar inframerah. Sistem sensor tersebut memiliki target untuk mendeteksi gas pada konsentrasi yang rendah, selektif dan sensitif pada target gas yang dituju dengan menerapkan filter optik berbasis interferometrik dan penguat *lock-in* berbasis digital. Sistem sensor juga harus memiliki reliabilitas yang tinggi terhadap perubahan waktu, dengan cara menerapkan sumber sinar inframerah yang berasal dari lampu pijar, desainnya berbiaya murah dan mudah diterapkan. Agar lebih efektif, penggunaan komponen elektronika disusun dalam sebuah rangkaian PCB yang saling berintegrasi.

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Perkembangan penelitian sistem sensor NDIR untuk keperluan pendeteksian gas telah banyak dilakukan oleh orang lain. Pada penelitian yang dilakukan oleh [2], mereka telah melakukan pengujian terhadap gas-gas karbon seperti CO_2 , CH_4 , CO, C_2H_2 , C_2H_4 and C_2H_6 yang berfokus pada gas emisi dari biomassa. Selain itu, terdapat penelitian yang mengkhususkan pengujian terhadap sampel gas karbon dioksida hasil respirasi manusia dengan konsentrasi pendeteksian hingga 5% dan resolusinya sekira 10 ppm [3]. Penelitian yang

dilakukan oleh telah berhasil membuat batas pendeteksian sebesar 10,33 ppm untuk CO₂, 8,81 ppm untuk N₂O dan 9,17 ppm untuk CH₄ [1].

Berbagai macam metode untuk pendeteksian dan pengukuran gas CO dan/atau NO yang tersedia saat ini berbiaya tinggi dan proses penerapannya terbatas. Metode tersebut antara lain adalah berbasis sel elektrokimia, sensor katalitik (butiran platinum), detektor ionisasi foto, detektor ionisasi api dan sebagainya. Metode-metode tersebut disebut dengan metode interaktif karena didasari jenis detektor gasnya. Teknologi sensor interaktif cenderung mengarah pada interferensi antara berbagai jenis macam gas dan kondisi lingkungan sekitar. Umumnya, model interaktif ini akan menurun kemampuannya seiring dengan berjalannya waktu dan membuat waktu penggunaannya menjadi terbatas.

Terdapat sebuah teknik pengukuran yang canggih dan telah berkembang dalam kurun waktu 20 tahun terakhir yakni TDLAS atau *Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy*. Teknik ini menggunakan luaran (output) laser sebagai pengatur yang koheren dengan sumber sinar. Akan tetapi, detektor TDLAS tidak lagi dipakai secara luas karena terbatasnya panjang gelombang sinar laser yang tersedia untuk menyediakan pita serapan panjang gelombang dari banyak molekul-molekul gas sehingga diperlukan cara lain seperti menggunakan laser *quantum cascade* yang harganya sangat mahal. Satu lagi tipe sensor gas berbasis optik yang menggunakan led inframerah seperti InAsSb seringkali dipakai hanya untuk keperluan khusus di mana ukuran sensor dan kecepatan responnya (1 ms atau lebih rendah) merupakan hal yang penting diperhatikan [10].

Berdasarkan alasan-alasan itulah yang melatarbelakangi bahwa teknik pendeteksian dan pengukuran gas berbasis sensor NDIR diyakini bisa menjadi solusi atas permasalahan tersebut. Pendeteksian gas menggunakan sensor NDIR memanfaatkan spektrum sinar inframerah dan di sisi lain, sensor NDIR memiliki tingkat konsumsi daya yang rendah. Ditambah lagi, pada rentang panjang gelombang sinar inframerah 1-15 μm , NDIR dapat dioperasikan pada temperatur yang rendah [11], memiliki konfigurasi sederhana, kuat dan sesuai dengan sistem mikro [12]. Penelitian sensor NDIR telah dilakukan dengan menambahkan sistem penguat *lock-in* berbasis analog dengan tujuan agar sistem sensor mampu mengenali informasi asli hasil pengujian yang terbenam karena derau dari luar [3].

Penelitian ini memanfaatkan sifat dan karakteristik gas CO dan NO di spektrum sinar inframerah untuk mendeteksi kedua jenis gas tersebut. Oleh karena itu, untuk menunjang pendeteksian, pengukuran dan analisis data gas, akan dibangun sebuah sensor NDIR yang dilengkapi oleh sistem pendukungnya.

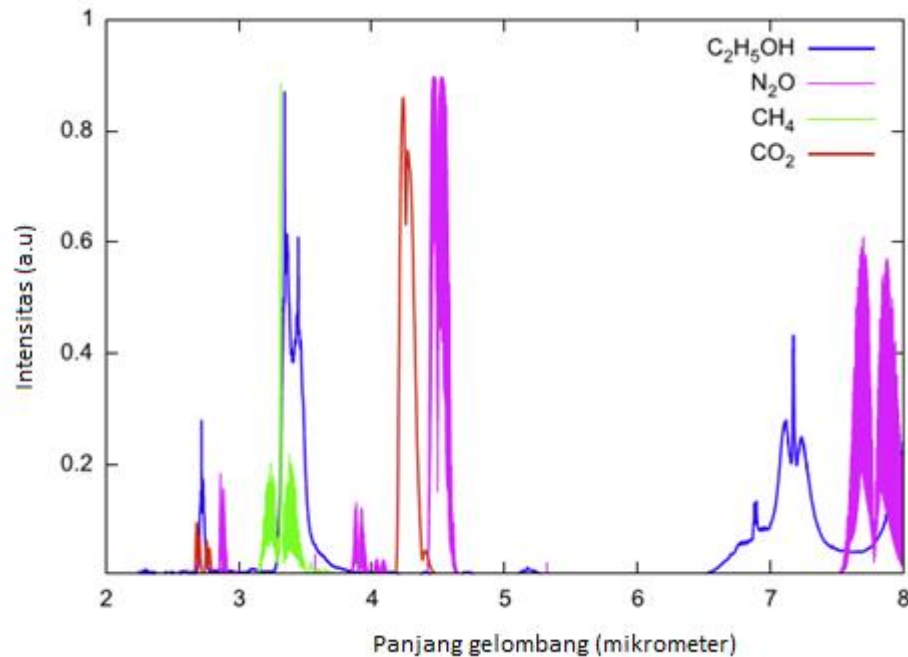
2.2 Sensor NDIR

Suatu sistem sensor NDIR merupakan bagian dari aplikasi spektroskopi sinar inframerah yang penelitiannya telah dimulai pada tahun 1930an di Amerika Serikat. Teknik ini memanfaatkan getaran atau vibrasi atom-atom suatu molekul karena dikenai oleh energi yang berasal dari gelombang sinar inframerah. Spektrum sinar inframerah umumnya didapatkan dari melewatkan sinar inframerah pada tabung sampel yang berisi molekul gas, kemudian besarnya fraksi sinar inframerah yang diserap oleh molekul gas di bagian energi tertentu (panjang gelombang) dapat ditentukan [6].

Pada tingkatan molekul, penyerapan atau pemancaran energi dapat terjadi dalam bentuk transisi antara tingkatan energi yang berbeda. Di daerah spektrum inframerah, transisi tersebut dapat diasosiasikan dengan perubahan energi getaran dan rotasi dari molekul. Jika energi dalam (*internal energy*) molekul terkuantisasi, maka molekul akan hadir pada tingkatan level energi tertentu yang diskrit. Setiap adanya perubahan tingkatan energi dalam bentuk getaran, pada saat yang sama berasosiasi dengan tingkatan energi dalam bentuk rotasi, yang kemudian menghasilkan beberapa tingkatan energi yang lokasinya berdekatan di pita frekuensi spektrum sinar inframerah.

Frekuensi dasar pada tempat di mana pita frekuensi hadir merupakan fungsi dari ikatan khusus dan mode getaran, seperti meregang atau menekuk. Ketika molekul terekspos sinar inframerah dengan tingkatan energi yang mampu membuat transisi getaran, maka sebagian radiasi diserap kemudian molekul mengalami transisi tingkatan energi. Besarnya tingkatan energi radiasi yang diserap, digunakan untuk menentukan jumlah dari banyaknya molekul yang ada. Sejauh terdapat sinar inframerah yang diserap oleh unsur-unsur yang berbeda, maka serapan yang terjadi karena percampuran gas di dalam tabung sampel hanya dapat diselesaikan dengan perangkat instrumentasi. Dengan demikian, cara yang paling pasti dan handal untuk

penginderaan target dalam bentuk molekul atau unsur dapat dilakukan dengan spektroskopi sinar inframerah tanpa adanya silang interferensi di antara substansi gasnya yang berbeda. Contoh berikut ini pada Gambar 2.1 adalah grafik penyerapan energi untuk berbagai macam molekul gas di spektrum sinar inframerah.

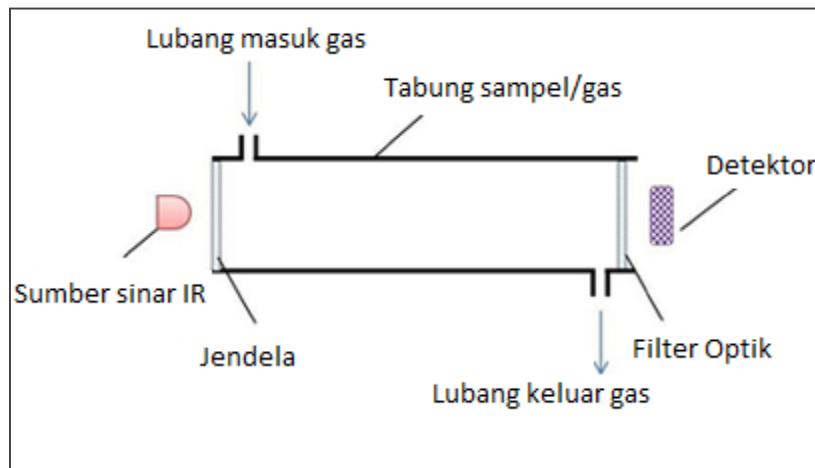


Gambar 2.1 Pita Serapan Energi dari Uap Etanol, Dinitrogen Monoksida, Metana dan Karbon Dioksida [13]

Sistem sensor NDIR umumnya terdiri dari berbagai sistem-sistem kecil yang disusun dengan konfigurasi tertentu dan membentuk sebuah sistem sensor NDIR yang utuh. Bagian terpenting dari sistem tersebut adalah sensor NDIR atau *Non-Dispersive Infrared*. Disebut sebagai *non-dispersive* karena metode ini membiarkan semua rentang panjang gelombang infra merah dengan intensitas tertentu melewati tabung sampel tanpa adanya deformasi. Tidak seperti metode pengukuran lainnya, NDIR mampu mendeteksi gas atau larutan beserta konsentrasinya tanpa adanya kontak langsung dalam tempo waktu yang singkat. Kelebihan lainnya adalah harganya yang murah, desainnya sederhana, selektivitasnya baik dan membutuhkan sedikit daya [14].

Teknik ini memungkinkan pengguna mendeteksi gas atau larutan lainnya seperti karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen monoksida (NO_x),

dinitrogen monoksida (N_2O), amonia (NH_3), asam klorida (HCl), asam flourida (HF), metana (CH_4) dan lainnya. Suatu NDIR sederhana umumnya terdiri dari sumber cahaya inframerah, tabung gas / sampel dan detektor inframerah seperti terlihat pada gambar di bawah ini [11]. Akan tetapi, tingkat kepresisian dan akurasi dari sensor NDIR untuk gas CO memiliki permasalahan yang perlu diperhatikan karena sifat sensor NDIR itu sendiri [6].



Gambar 2.2 Bagian Utama Pada Sensor NDIR [11]

Prinsip kerja pengukuran gas menggunakan NDIR adalah berdasarkan hukum Lambert-Beer, seperti tertulis berikut:

$$I = I_0 \cdot e^{-kCL} \quad (2.1)$$

dimana I_0 adalah intensitas awal cahaya inframerah monokromatik, I adalah intensitas cahaya inframerah setelah melewati sampel dan diterima oleh detektor, k adalah koefisien serapan, C adalah konsentrasi gas/larutan dan L adalah panjang lintasan optik yang didefinisikan sebagai panjang tabung sampel efektif dari sensor. Untuk menentukan besarnya nilai serapan (A) berdasarkan hukum Lambert-Beer dapat menggunakan formula berikut:

$$A = -\log T = -\log \frac{I}{I_0} \quad (2.2)$$

dimana T adalah transmitansi dan A adalah absorbansi atau serapan.

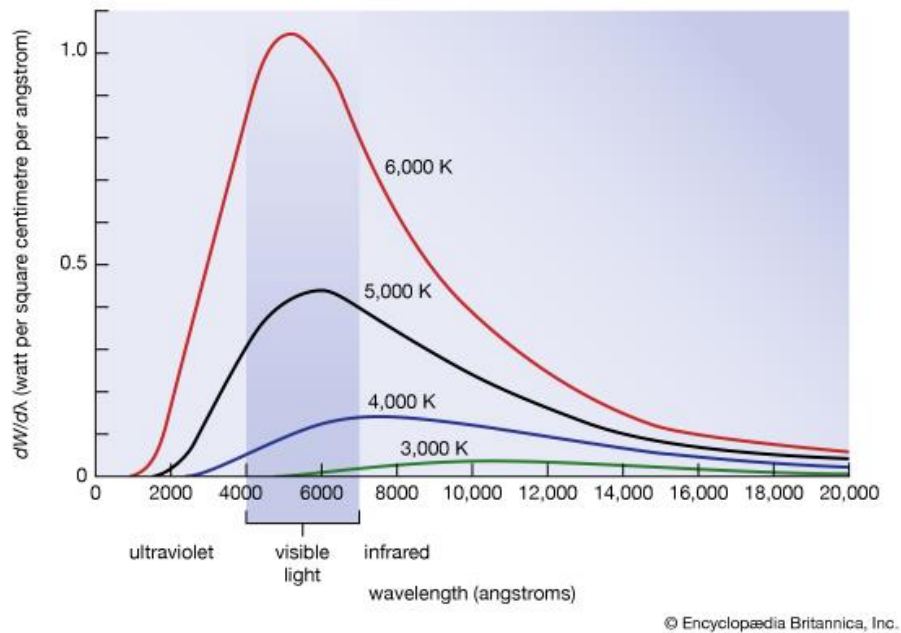
2.2.1 Sumber Sinar Inframerah

Sumber sinar inframerah yang bisa digunakan oleh sensor NDIR dapat berasal dari berbagai jenis macam komponen dengan karakteristiknya masing-masing. Berdasarkan Gambar 2.2 cahaya inframerah yang berasal dari sumber kemudian melewati tabung sampel untuk menuju detektor di sisi lainnya. Penelitian sensor NDIR dilakukan dengan menggunakan kawat nikrom sebagai sumber cahaya inframerah dan bisa menghasilkan rentang panjang gelombang antara 0,7 – 20 μm [14]. Berdasarkan referensi, lampu pijar memiliki temperatur warna sekira 2700K [15] dan berkorelasi dengan panjang gelombang visual serta inframerah.

Berkaitan dengan panjang gelombang dan suhu, dapat menggunakan rujukan teori hukum pergeseran Wien. Hukum tersebut berbunyi, ketika temperatur dari suatu *blackbody radiator* naik, maka keseluruhan energi radiasi akan naik dan puncak kurva radiasi bergeser ke panjang gelombang yang lebih pendek. Hukum Pergeseran Wien memiliki representasi grafis seperti terlihat pada gambar 2.3. Formulasi dari hukum Pergeseran Wien adalah sebagai berikut:

$$\lambda_{max}T = 2,898.10^{-3}m.K \quad (2.3)$$

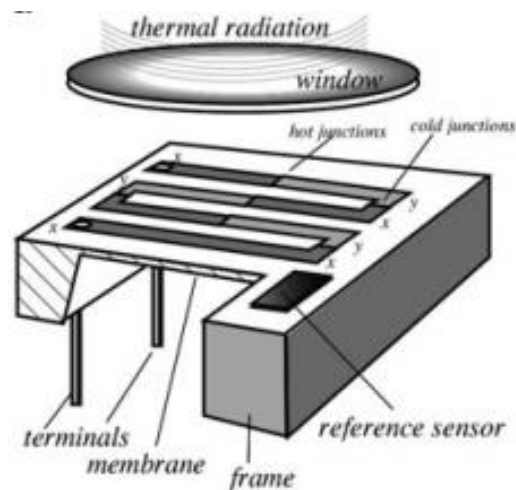
dimana T adalah suhu dalam satuan Kelvin dan λ_{max} adalah panjang gelombang maksimum [16]. Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa semakin rendah nilai panjang gelombang dari suatu sinar, maka nilai kerapatan daya per satuan luas semakin bergeser ke suhu yang lebih tinggi.



Gambar 2.3 Grafik Kerapatan Daya Per Satuan Luas Terhadap Panjang Gelombang Cahaya pada Hukum Pergeseran Wien [17]

2.2.2 Detektor Sinar Inframerah

Penelitian yang berkaitan dengan sensor NDIR umumnya menerapkan penggunaan detektor termopile untuk mengukur intensitas sinar inframerah yang telah melewati sampel. Penggunaan termopile sebagai detektor pada sensor NDIR dilakukan oleh [1], [3]. Termopile adalah suatu komponen elektronika yang menggunakan prinsip kerja seperti termokopel dimana mampu menghasilkan tegangan listrik bernilai ratusan μV untuk setiap perubahan temperatur sebesar 1°C . Satu komponen termopile setidaknya terdiri dari 50-100 *junction* termokopel yang disusun secara seri maupun paralel. Dengan demikian, jika termopile dipasang dengan baik, maka dapat menghasilkan tegangan 50-100 kali lebih besar dibandingkan dengan satu termokopel saja. Penampakan termopile terlihat seperti pada Gambar 2.4 berikut ini:



Gambar 2.4 Skematik Detektor Termopile untuk Mengukur Intensitas Sinar Inframerah [16]

Berdasarkan Gambar 2.4 di atas, cahaya inframerah yang diserap dan dipancarkan oleh membran membuat temperatur membran berubah. Selanjutnya, membran membawa ‘hot junctions’ sedangkan *frame* membawa ‘cold junctions’, dengan demikian, terdapat perbedaan temperatur sehingga menghasilkan tegangan listrik. Besarnya temperatur pada membran dipengaruhi oleh kapasitas termal, konduktivitas termal terhadap *frame* dan intensitas cahaya inframerah yang diterima. Sedangkan faktor yang memengaruhi tingkat akurasi detektor inframerah antara lain adalah reflektivitas, transmisivitas dan emisivitas [18].

Luaran atau *output* termopile berupa tegangan dc yang linear terhadap temperatur di bagian ‘hot junction’nya. Besarnya tegangan yang dihasilkan berbanding lurus terhadap radiasi termal yang datang [16]. Sebagai informasi tambahan, detektor inframerah termopile sering digunakan untuk penelitian detektor NDIR karena memiliki kemampuan responsivitas sinar inframerah pada rentang 6 – 14 μm dan karakteristik lainnya terangkum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Dasar Detektor Termopile [16]

Parameter	Nilai	Unit	Kondisi
Area sensitif	0,5 – 2	mm ²	-
Responsivitas	50	V/W	6 – 14 μm, 500K
Derau (noise)	30	nV/√Hz	25 °C, rms
Resistansi ekivalen	50	kΩ	25 °C
Konstanta suhu-waktu	50	ms	-
TCR	0,15	%/K	-
Koefisien suhu dari responsivitas	-0,2	%K	-
Suhu pengoperasian	-20 – 80	°C	-
Suhu penyimpanan	-40 - 100	°C	-
Harga	1 - 10	US\$	-

Detektor termopile tetap mengikuti kaidah teori efek Seebeck mengenai *hot junction* dan *cold junction*. Besarnya tegangan luaran (*output*) yang dihasilkan oleh termopile berkaitan dengan nilai responsivitasnya. Responsivitas atau sensitivitas (S) dan tegangan *output* (U_{out}) pada detektor termopile diketahui dari formula berikut:

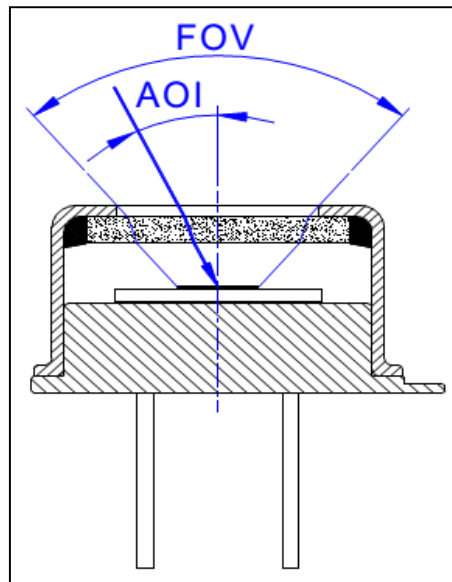
$$S = \frac{U_{out}}{P_{rad}} \text{ satuan (V/W)} \quad (2.4)$$

$$U_{out} = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

$$\alpha = \frac{U_{out}}{\Delta T} \text{ satuan (V/K)} \quad (2.6)$$

Nilai ΔT merupakan selisih antara nilai suhu ruangan dan suhu objek. Berdasarkan informasi dari *datasheet*, detektor termopile memiliki karakteristik $S = \frac{35V}{W}$ pada kondisi $T = 500K$ dan $1Hz$, maka nilai α dapat diperkirakan sebesar $\alpha = \frac{35}{500} = 0,07V/K$. Nilai ini dapat menjadi prakiraan nilai tegangan luaran termopile terhadap kenaikan nilai temperatur dalam satuan Kelvin. Sedangkan karakteristik termistor (NTC) yang ada di detektor termopile memiliki nilai β sekira 3964 dan nilai hambatannya menurun terhadap kenaikan suhu.

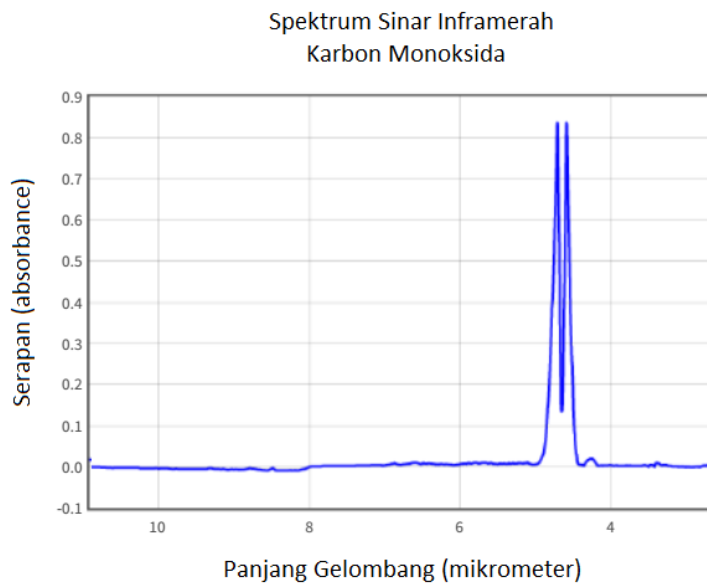
Mengaplikasikan termopile sebagai detektor sinar inframerah harus memerhatikan bidang pandang (*field of view*) yang bertujuan agar intensitas sinar inframerah yang datang bernilai maksimal dan meminimalkan radiasi yang tidak diinginkan. Sudut datang yang besar (*Angle of Incidence* = AOI) harus dihindari untuk penerapan filter sinar inframerah dekat (NIR) seperti pada pemakaian di sistem NDIR. Pada keadaan ini, perubahan kondisi fisik dari *cut-on* dan *cut-off* sinar inframerah berpindah menuju panjang gelombang yang lebih pendek dan ikut mengubah karakteristik spektral detektornya [19].



Gambar 2.5 Bidang Pandang Pada Detektor [19]

2.3 Karakteristik Gas CO dan NO di Spektrum Sinar Inframerah

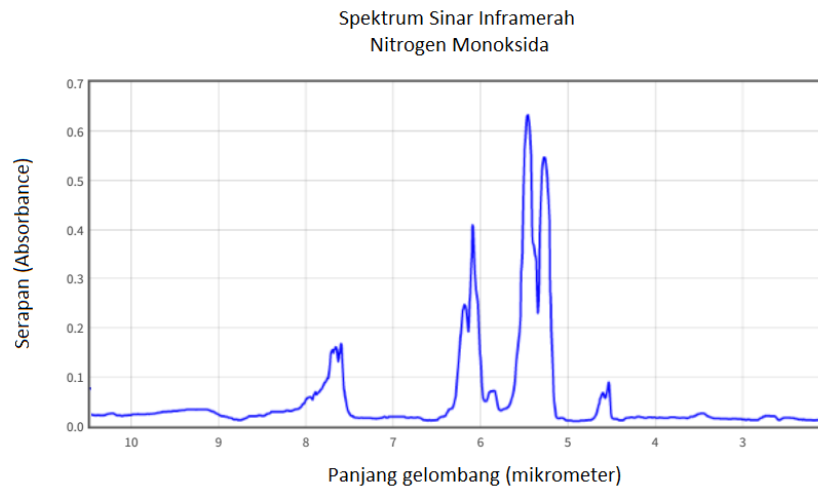
Penelitian yang diusulkan kali ini bertujuan untuk mendeteksi keberadaan gas CO (karbon monoksida) dan NO (nitrogen monoksida) menggunakan sensor NDIR yang tersusun dalam bentuk sistem. Pendeteksian gas CO dan NO memiliki tantangan tersendiri karena jumlahnya jauh lebih sedikit dibandingkan dengan gas karbon dioksida di dalam suatu campuran udara yang sama. Keterlibatan sinar inframerah menjadi penting karena gas-gas CO dan NO memiliki karakteristik yang khusus di rentang panjang gelombang MIR atau *mid-infrared* yang bernilai 3 – 20 μm [20].



Gambar 2.6 Spektrum Serapan Gas CO Pada Panjang Gelombang Sinar Inframerah MIR [21]

Karakteristik kedua macam gas tersebut harus diketahui dengan baik dan jelas agar hasil pengukuran yang dilakukan nantinya dapat menampilkan data yang sebenarnya. Karakteristik gas CO terdapat di spektrum sinar inframerah dan berkaitan dengan spektrum penyerapan (absorbansi) beserta transmitansinya, seperti terlihat seperti pada Gambar 2.6. Karakteristik gas CO memiliki puncak serapan berada di rentang panjang gelombang 4,5 – 5,0 μm , tepatnya 4,6 μm sehingga dibutuhkan suatu *bandpass* filter yang selektif menangkap pada panjang gelombang tersebut [21]. Hal tersebut menjadi tantangan untuk tema penelitian ini karena pada panjang gelombang 4,26 μm , terdapat puncak serapan gas CO_2 di rentang panjang gelombang MIR.

Di spektrum sinar inframerah MIR, gas NO memiliki nilai puncak absorbansi dan transmitansi pada rentang 5,0 – 6,0 μm seperti terlihat pada Gambar 2.7. Dengan dua macam permasalahan tersebut, perlu kiranya menggunakan suatu filter optik yang khusus bekerja (selektif) pada rentang panjang gelombang inframerah untuk gas CO dan NO.



Gambar 2.7 Spektrum Serapan Gas NO Pada Panjang Gelombang Sinar Inframerah MIR [22]

2.4 Filter Optik

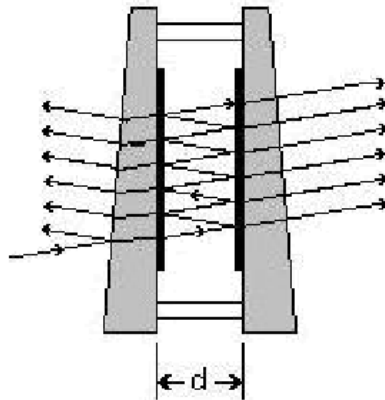
Pada sensor NDIR, panjang gelombang sinar inframerah yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas tertentu dapat dipisahkan dengan menggunakan filter optik. Filter optik yang umum digunakan berbasis interferensi dan *dichroic* yang dijelaskan pada subbab di bawah ini.

2.4.1 Fabry-Perot Interferometer

Penelitian dengan menerapkan interferometer Fabry Perot untuk mengukur konsentrasi senyawa yang mudah menguap telah dilakukan oleh [23]. Koskinen telah menciptakan sebuah inovasi untuk menstabilkan pengukuran gas menggunakan sensor NDIR. Inovasinya berupa penyaringan (filterisasi) sinyal yang diukur menggunakan interferometer Fabry-Perot (FP). Interferometer tersebut menggunakan minimal dua Interferometer tersebut menggunakan minimal dua macam panjang gelombang dari *pass-band* interferometer. Keunggulan rancangan tersebut adalah kestabilan sistemnya tahan lama dan tidak membutuhkan proses kalibrasi sistem.

Interferometer Fabry-Perot telah lama dikembangkan dengan berbagai macam teknik yang melandasinya dan hasilnya adalah nilai transmitansinya mampu mencapai 100% [11]. Filter *band-pass* sempit (diukur pada level transmitansi

setengah puncak) memiliki lebar pita (*bandwidth*) kurang dari 6% terhadap nilai pusat panjang gelombangnya. Filter tersebut dapat menghasilkan nilai transmisi yang tinggi (lebih dari 60%) bersamaan dengan tingkat atenuasi (redaman) yang tinggi di luar *pass-band* (bernilai kurang dari 0,1%).



Gambar 2.8 Fabry-Perot Etalon [24]

Filter Fabry-Perot bekerja mengikuti kaidah interferensi gelombang setelah adanya pantulan cahaya dari cermin paralel. Untuk memastikan terjadinya interferensi, perbedaan jarak pada lintasan cahaya (*optical path*) di antara gelombang berturut-turut yang meninggalkan filter harus sama dengan perkalian integer dari panjang gelombangnya.

Bayangkan terdapat suatu lempeng tipis paralel material dielektrik yang memiliki ketebalan d . Lapisan film pada lempeng tersebut memiliki kemampuan tidak menyerap energi dan nilai amplitudo koefisien refleksi pada antarmuka pelat sangat rendah sehingga hanya perlu memerhatikan satu dari dua sorotan sinar yang dipantulkan E_{1r} dan E_{2r} . Pada keadaan ini, S berlaku sebagai titik sumber sinar monokromatik.

Lapisan film berlaku sebagai komponen pemisah amplitudo, sehingga E_{1r} dan E_{2r} dapat dipertimbangkan muncul dari dua sumber virtual di belakang lapisan film. Dengan demikian, dua citra S yang terbentuk karena proses pematulan pada antarmuka pertama dan kedua. Sinar yang dipantulkan memiliki konfigurasi paralel ketika meninggalkan lapisan film dan dapat dibawa bersama-sama menuju titik P di atas bidang fokus objektif teleskop atau retina mata ketika difokuskan pada

tingkat tak terbatas [25]. Dapat diketahui bahwa perbedaan panjang lintasan optik untuk sinar yang dipantulkan dapat diketahui sebagai berikut:

$$\Lambda = n_f[(\overline{AB}) + (\overline{BC})] - n_1(\overline{AD}) \quad (2.7)$$

dimana,

$$(\overline{AB}) = (\overline{BC}) = d / \cos \theta_t \quad (2.8)$$

maka

$$\Lambda = \frac{2n_f d}{\cos \theta_t} - n_1(\overline{AD}) \quad (2.9)$$

dan ekspresi nilai (\overline{AD}) ditulis menjadi:

$$(\overline{AD}) = (\overline{AC}) \sin \theta_i \quad (2.10)$$

dengan menggunakan hukum Snell, dapat ditulis menjadi

$$(\overline{AD}) = (\overline{AC}) \frac{n_f}{n_1} \sin \theta_t \quad (2.11)$$

dimana

$$(\overline{AC}) = 2d \tan \theta_t \quad (2.12)$$

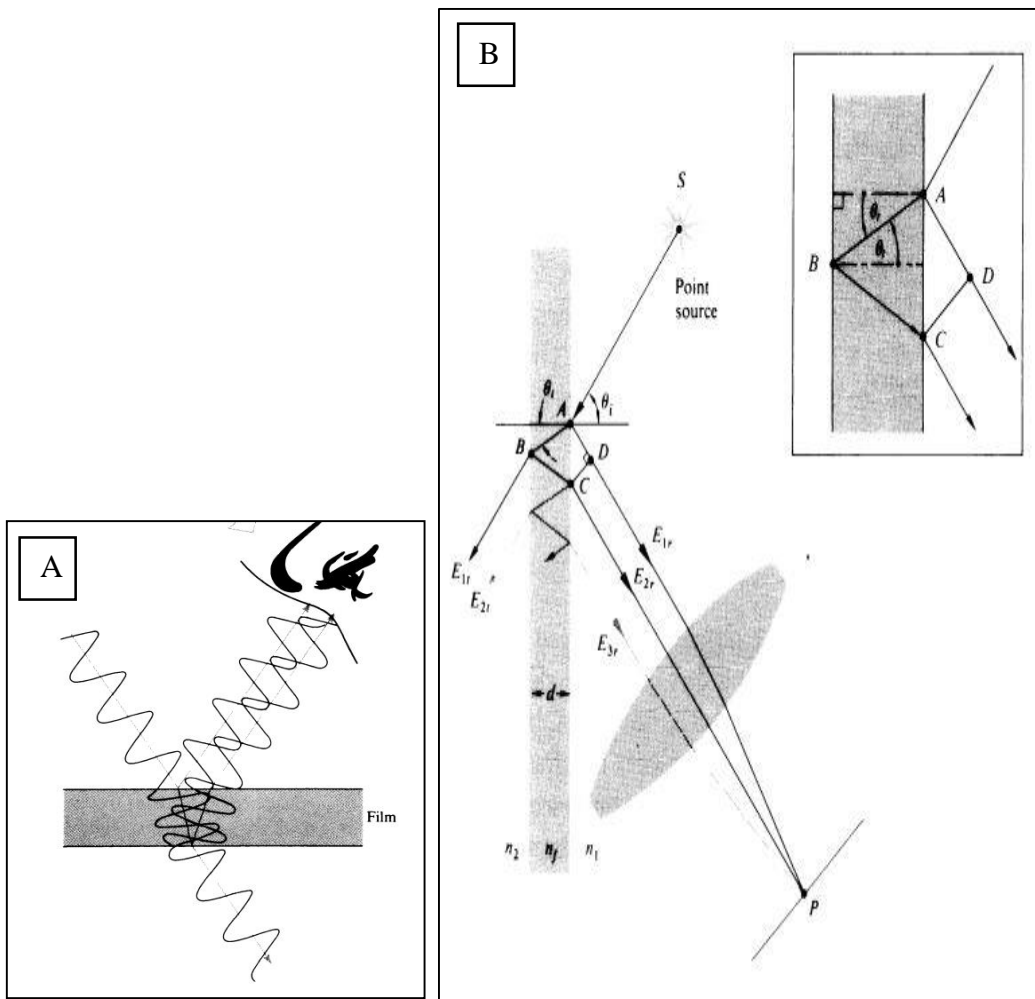
ekspresi penulisan Λ menjadi

$$\Lambda = \frac{2n_f d}{\cos \theta_t} (1 - \sin^2 \theta_t) \quad (2.13)$$

dan disederhanakan menjadi:

$$\Lambda = 2n_f d \cos \theta_t \quad (2.14)$$

Jika lapisan film terbenam pada medium tunggal, maka indeks bias dapat ditulis lebih sederhana menjadi $n_1 = n_2 = n$. Nilai indeks bias tersebut dapat lebih besar atau lebih kecil dari indeks bias n_f .



Gambar 2.9 (A) Pola Kisi – kisi Terbentuk Akibat Sinar Dipantulkan dari Lapisan Permukaan Atas dan Bawah Film. (B) Pola Kisi-Kisi yang Terbentuk dari Perbedaan Sudut Inklinasi [25].

Pada struktur Fabry-Perot terdapat celah yang memisahkan dua material, dimana material tersebut memiliki reflektivitas yang berbeda. Jika posisi celah Heterostruktur Fabry-Perot tersebut dapat digerakkan (*adjusted*) maka struktur ini disebut Fabry-Perot *interferometer*, sedangkan jika celah tersebut permanen (*unadjusted*) maka struktur ini disebut Fabry-Perot *etalon*. Jenis filter Fabry-Perot yang permanen (*fixed*) dapat dikonfigurasi untuk melewati panjang gelombang tunggal berdasarkan ketebalan resonator yang telah disesuaikan dengan persamaan interferensi. Dengan catatan harus dikombinasikan bersama filter *band-pass* untuk menolak orde-orde interferensi lainnya [26].

2.4.2 Filter *Dichroic*

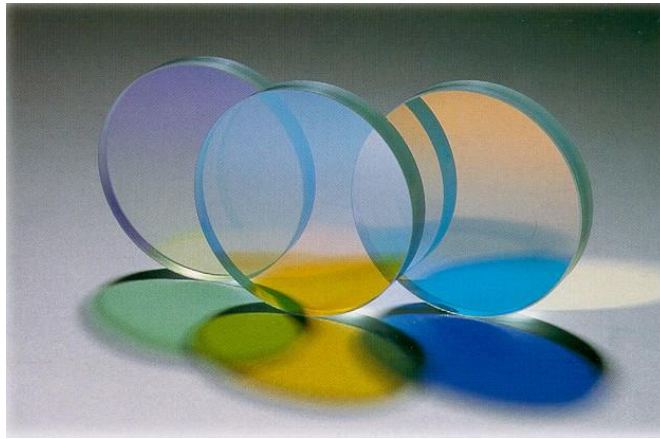
Teknologi filter yang digunakan untuk tujuan pemisahan panjang gelombang dengan rentang yang berdekatan (*narrow-band*) dapat menggunakan kombinasi dari berbagai macam endapan (*deposition*) di lapisan film tipis (*thin film*) filter interferensi. Pita panjang gelombang yang tidak diinginkan dapat dicapai dengan menggunakan substrat pilihan, tumpukan filter refleksi sinar (*reflectance*) atau dengan menambahkan lapisan kaca penyerap.

Sinar inframerah yang ingin dipantulkan ke tiap lapisan film harus menyesuaikan kebutuhan dan mengikuti parameter-parameternya. Hasil dari pantulan sinar untuk panjang gelombang tertentu dapat konstruktif atau tingkat pantulannya tinggi dan destruktif atau tingkat transimitansinya tinggi. Pemanfaatan interferensi dapat dilakukan untuk menghasilkan suatu filter *band-pass* sempit (*narrow band-pass filter*) yang bertujuan untuk mengisolasi suatu rentang panjang gelombang tertentu di spektrum sinar inframerah.

Filter *dichroic* merupakan salah jenis filter lainnya yang dapat diterapkan di spektrum sinar inframerah. Disebut *dichroic* karena lapisan film bagian akhir bersifat memantulkan cahaya secara sempurna kemudian filter *dichroic* hanya memantulkan panjang gelombang tertentu. Filter jenis ini umumnya dibuat hanya untuk sinar datang normal dan bergeser menuju panjang gelombang yang pendek jika terdapat kemiringan (sudut) tertentu.

Contoh penerapan filter *dichroic* terdapat pada sinar intensitas tinggi yang bisa dikenali oleh mata manusia dengan menggunakan sumber sinar putih. Prinsip dasar filter *dichroic* adalah menggunakan interferensi lapisan film tipis dan menghasilkan warna, sama halnya yang terjadi dengan warna yang dihasilkan dari lapisan tipis minyak di atas permukaan air. Teori yang melatarbelakanginya adalah, ketika sinar polikromatik dengan sudut sebesar θ datang menabrak lapisan tipis minyak, maka terdapat bagian sinar yang dipantulkan dari atas permukaan lapisan minyak dan di bawah permukaan air (jika di bawah lapisan minyak adalah air). Sinar yang dipantulkan di bawah permukaan air memiliki lintasan cahaya yang lebih panjang dibandingkan jika memantul hanya pada lapisan tipis minyak sehingga terdapat keterlambatan (*delay*) pada sebagian sinar untuk diterima balik

dan sebagian lainnya hilang. Hal ini menjadi sebab warna dapat terlihat oleh mata manusia



Gambar 2.10 Filter *Dichroic*

Fenomena lapisan tipis minyak menjadi ide dasar pembuatan filter *dichroic*. Agar dapat menghasilkan interferensi, lensa kaca dilapisi oleh beberapa lapisan film tipis yang memiliki nilai indeks bias yang berbeda. Antarmuka antara satu lapisan dengan lapisan yang memiliki indeks bias yang berbeda menghasilkan refleksi bertahap (*phase reflections*), secara selektif memperkuat panjang gelombang cahaya tertentu dan mengganggu panjang gelombang lainnya.

Pengaturan ketebalan dan jumlah lapisan tipis membuat frekuensi dari suatu rentang panjang gelombang dapat diatur dengan tujuan menghasilkan rentang panjang gelombang yang lebih sempit. Filter *dichroic* memiliki sifat tidak menyerap energi yang tidak diinginkan selama beroperasi sehingga tidak menimbulkan panas seperti pada filter umumnya.

2.5 Sistem Pengolah Data

Pada sistem sensor NDIR, terdapat juga sistem lainnya yang lebih kecil yang salah satunya adalah sistem pengolah data. Sistem pengolah data yang diusulkan untuk digunakan pada penelitian kali ini terdiri dari rangkaian penguat *non-inverting*, penguat *lock-in*, filter *low-pass*, mikrokontroler dan komputer. Luaran yang dihasilkan oleh detektor termopile tentunya memiliki nilai sinyal

tegangan yang rendah (orde mV) dan sulit untuk dianalisis lebih lanjut tanpa adanya suatu bentuk ‘gangguan’ yang berasal dari luar.

Gangguan tersebut berupa penguatan sinyal tegangan dengan menggunakan suatu rangkaian penguat yang khusus dan mampu bekerja untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Rangkaian penguat yang diusulkan pada penelitian ini adalah penguat *lock-in*.

2.5.1 Konsep Rangkaian Penguat *Lock-In*

Detektor termopile merupakan komponen yang rentan dipengaruhi oleh derau (noise) seperti suhu, jala-jala tegangan listrik, sinyal geser (*drift*), derau frekuensi rendah ($1/f$), derau shot [27]. Derau suhu (*thermal noise*) merupakan sumber utama sinyal pengganggu, yang nilainya hampir 5 kali lebih besar dari derau radiasi latar di sekitar pengukuran. Untuk mengkompensasi besarnya sinyal geser karena efek perubahan suhu lingkungan, dapat digunakan sistem pendingin yang diterapkan pada detektor.

Oleh karena respon detektor berada pada pita frekuensi yang sempit, maka derau suhu mengakibatkan nilai SNR menjadi terdistorsi [28]. Suatu penguat *lock-in* membandingkan sinyal yang diterima (+ derau) dengan sinyal referensi yang telah diberikan. Sinyal dengan frekuensi gelombang referensi telah dibersihkan dari percampuran komponen derau sinyal masukan. Agar teknik ini lebih efektif, frekuensi operasi di sistem NDIR harus bisa menolak frekuensi derau, contohnya sinyal derau sebesar 50 Hz yang berasal dari peralatan laboratorium atau sumber DC pada frekuensi rendah [3].

Konsep mengenai penguat *lock-in* adalah sistem yang dapat digunakan untuk mendeteksi sinyal sinus (AC) yang bernilai sangat rendah sekira nanoVolt. Pengukuran yang akurat terhadap sinyal tetap dapat dilakukan meskipun sinyal tersebut tertutup oleh derau (*noise*) yang nilainya ribuan kali lebih besar. Teknik yang dipakai oleh penguat *lock-in* dikenal dengan Pendeteksian Fase Sensitif (*Phase Sensitive Detection*) pada frekuensi referensi dan fase yang spesifik. Derau sinyal yang memiliki frekuensi lebih tinggi dari frekuensi referensi akan ditolak dan tidak diperhitungkan dalam pengukuran.

Cara kerja penguat *lock-in* ternyata berawal dari konsep yang sederhana. Bayangkan terdapat sumber sinyal input sinusoidal seperti pada persamaan 2.12,

$$V(t) = V_o \sin(\omega t + \phi) \quad (2.15)$$

pada saat yang bersamaan terdapat sinyal referensi,

$$V_R(t) = \sin(\Omega t) \quad (2.16)$$

hasil perkalian antara persamaan 2.12 dan 2.13 terlihat pada persamaan 2.14 yang mana terdapat komponen penjumlahan dan pengurangan nilai frekuensi,

$$V(t)V_R(t) = \frac{V_o}{2} \{ \cos[(\omega - \Omega)t + \phi] - \cos[(\omega + \Omega)t + \phi] \} \quad (2.17)$$

Ketika sinyal masuk (input) memiliki frekuensi yang nilainya berbeda dari frekuensi referensi Ω , maka luarannya akan berosilasi terhadap waktu dengan nilai rata-ratanya adalah nol. Akan tetapi, jika sinyal masuk bernilai sama dengan referensi, $\omega = \Omega$, maka hasil luarannya seperti pada persamaan 2.15 berikut ini,

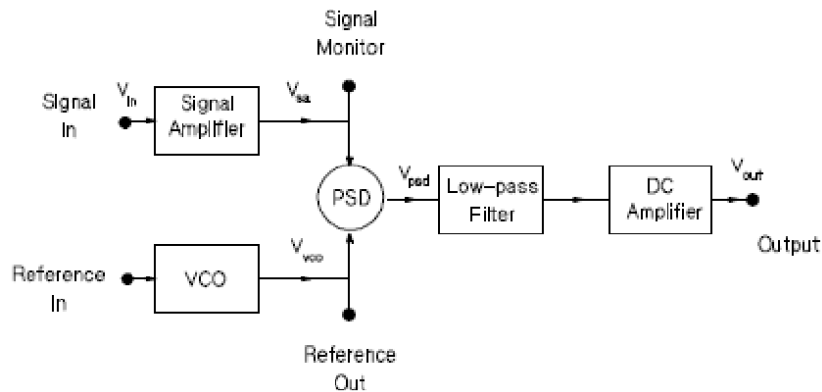
$$V(t)V_R(t) = \frac{V_o}{2} \{ \cos[\phi] - \cos[(2\Omega)t + \phi] \} \text{ untuk } \omega = \Omega \quad (2.18)$$

jika persamaan 2.18 diberikan low-pass filter, maka luarannya akan menjadi:

$$V(t)V_R(t) = V_2 = V_o \cos(\phi) \quad (2.19)$$

Jika sinyal DC dapat diekstrak dan fase ϕ dapat diubah nilainya, maka amplitudo V_o dapat diketahui nilainya. Dengan demikian, kuantitas frekuensi yang diinginkan harus diatur pada osilasi Ω sehingga membuat sinyal yang tidak diinginkan tertolak seperti halnya derau [29].

Konsep yang sederhana tentang rangkaian penguat *lock-in* kemudian diterapkan dalam bentuk blok diagram dan terlihat pada Gambar 2.11 berikut ini

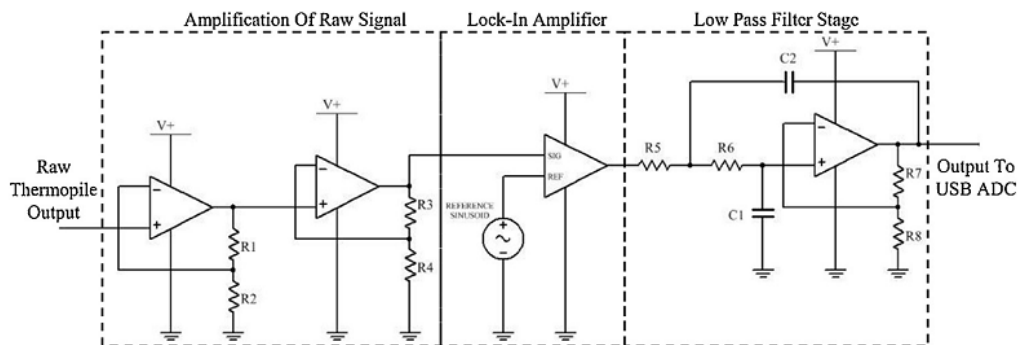


Gambar 2.11 Blok Diagram Penguat *Lock-in* [29]

Suatu rangkaian penguat *lock-in* umumnya terdiri dari lima bagian penting antara lain adalah:

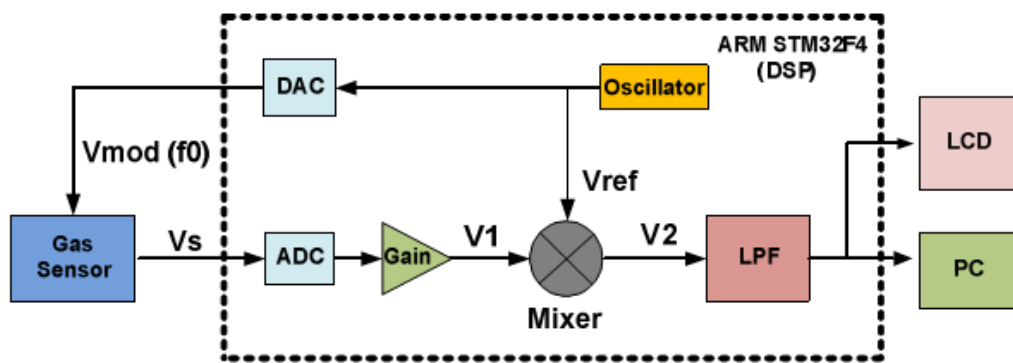
1. Penguat tegangan AC atau disebut dengan amplifier signal
2. *Voltage controlled oscillator* (VCO)
3. *Multiplier*, disebut dengan Phase Sensitive Detector (PSD)
4. *Low pass* atau filter untuk melewatkan frekuensi rendah
5. Penguat tegangan DC

Penelitian yang dilakukan oleh [3], menjadikan penguat *lock-in* yang tersedia sebagai basis sistem pengukuran. Sinyal yang diterima dari detektor termopile kemudian dibandingkan dengan sinyal *drive* pada sumber sinar membuat gelombang sinus asli menjadi bersih. Skematik susunan rangkaian penguat *lock-in* terlihat seperti pada Gambar 2.12 di mana rangkaian regulator tegangan dan resistor variabel yang mengatur besarnya frekuensi *cut-off* (f_c) dihilangkan.



Gambar 2.12 Skematik Rangkaian pada Sistem Penguat *Lock-in*, Penguat Tingkat Pertama, IC Penguat *Lock-in* dan Sistem Filter Tahap Akhir [3]

Penelitian yang dilakukan dengan mengimplementasikan teknik penguat *lock-in* secara *offline*/menggunakan bantuan *software* Matlab [30]. Sedangkan penelitian lain mengusulkan sistem rangkaian penguat *lock-in* berbasis digital dengan konstruksi yang sederhana, mudah dikonfigurasi dan memiliki performa yang tinggi [27]. Blok diagram dari rangkaian penguat *lock-in* yang diusulkan di penelitian mereka adalah sebagai berikut:



Gambar 2.13 Blok Diagram Rangkaian Penguat *Lock-in* [27]

Sensor termopile dimodulasi oleh sinyal (V_{mod}) yang berasal dari osilator dengan frekuensi f_0 . Luaran sensor adalah V_s yang kemudian dikonversi menjadi bentuk sinyal digital. Selanjutnya, sinyal digital masuk ke rangkaian penguat untuk derau rendah. Setelah diperkuat, sinyal kemudian masuk ke *mixer* untuk dikalikan dengan sinyal referensi, V_{ref} .

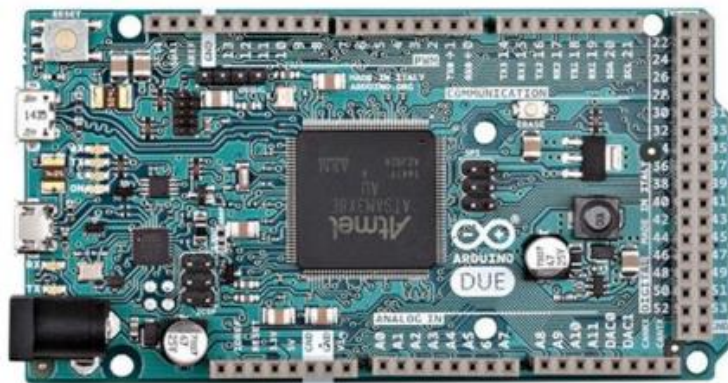
Selanjutnya, sinyal yang berasal dari *mixer* diekstrak menggunakan rangkaian LPF (low-pass filter) dengan tujuan untuk mendapatkan sinyal searah (DC). Penerapan LPF harus memperhatikan frekuensi *cut-off* (f_c), frekuensi maksimum dan frekuensi sampling yang digunakan. Jika LPF diterapkan pada sinyal dengan $f_c \ll \frac{\omega}{2}$, maka komponen sinyal pada frekuensi yang tinggi dimatikan (*muted*). Untuk menentukan besarnya nilai f_c pada LPF orde satu, digunakan persamaan berikut:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.20)$$

Dimana R adalah resistansi (Ohm) dan C adalah kapasitansi (Farad). Peningkatan nilai SNR (Signal to Noise Ratio) dapat dicapai dengan menaikkan nilai *gain*nya [27]. Penggunaan penguat *lock-in* dapat membantu untuk mengekstrak data secara cepat yang berasal dari sinyal respon detektor dan mengurangi penggunaan filter orde tinggi [3]. Adapun pada penelitian lain menerapkan LPF dalam bentuk filter digital rekursif yang mana persamaan beda yang digunakan dapat diketahui dengan bantuan perangkat lunak Matlab [5].

2.5.2 Mikrokontroler

Sistem pengolah data dalam bentuk sinyal membutuhkan suatu mikrokontroller yang mampu melakukan tugas pemrosesan dengan cepat dan handal. Mikrokontroler yang digunakan pada penelitian kali ini adalah Arduino DUE dengan basis prosesor Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. Spesifikasi umum Arduino DUE antara lain adalah memiliki resolusi bit hingga 12 bit, 54 pin digital *input/output*, 12 *input* analog, 4 UARTs (*hardware serial ports*), 84 MHz clock, menggunakan kabel USB (*micro*) OTG, 2 DAC (*digital to analog*), 2 TWI, *flash memory* 512KB, SRAM 96KB (terbagi menjadi dua *banks* 64KB dan 32 KB), sebuah *jack* catu daya power, sebuah *header* SPI, sebuah *header* JTAG, sebuah tombol reset dan hapus. Tidak seperti modul arduino yang lain, khusus pada Arduino DUE tegangan pengoperasiannya adalah 3,3V.



Gambar 2.14 Modul Mikrokontroler Arduino Due

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian desain sistem sensor NDIR untuk pendeteksian gas CO dan NO memiliki tahapan-tahapan yang harus dilalui seperti berikut ini:

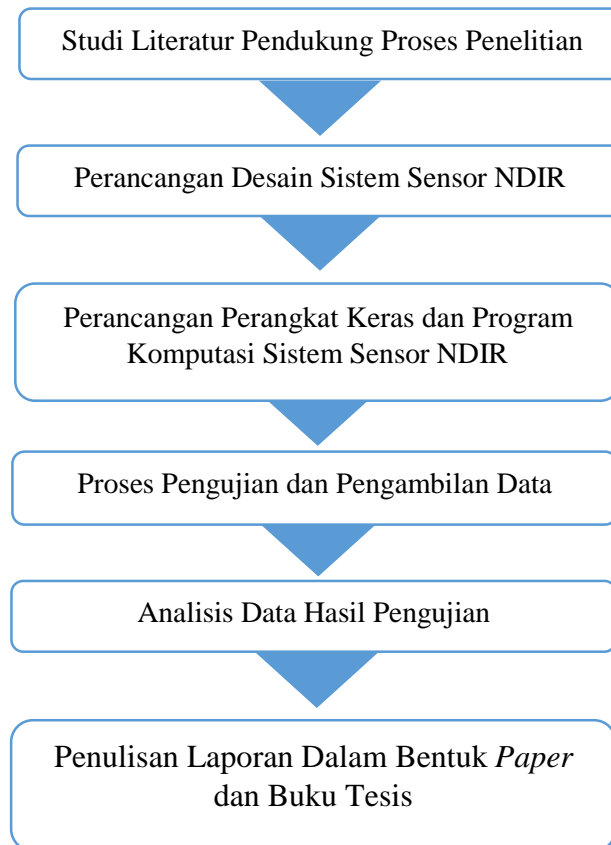
1. Perancangan sistem sensor NDIR
2. Perancangan perangkat keras dan program komputasi
3. Proses pengujian sistem sensor NDIR dan pengambilan data
4. Analisis data dan kesimpulan hasil penelitian.

Perancangan sistem merupakan bagian rancangan konfigurasi komponen-komponen pada sistem sensor NDIR yang terdiri dari *input*, sensor NDIR, sistem pengolah data dan data luaran hasil pengujian untuk keperluan analisis. Perancangan perangkat keras membahas rancangan bentuk sensor NDIR beserta komponen dan rangkaian elektronik yang dipakai, seperti sumber sinar inframerah, detektor termopile, filter optik berbasis interferometrik, penguat *non-inverting* dan rangkaian catu daya.

Sedangkan program komputasi adalah perancangan perangkat lunak yang terdiri dari program mikrokontroler dan tampilan antar muka (GUI). Program mikrokontroler dipakai oleh sistem sensor NDIR untuk *driver* sumber sinar inframerah, pengambilan data respon detektor termopile, penguat *lock-in* berbasis digital dan pengiriman data antara sistem sensor NDIR dengan komputer memanfaatkan *serial monitor* mikrokontroler dengan tampilan antarmuka GUI.

Pengambilan data dilakukan ketika sistem sensor NDIR telah disusun lengkap. Data yang diambil berupa hasil pendeteksian gas mengandung senyawa CO dan NO dari sampel yang nyata (*real*) menggunakan sistem sensor NDIR. Selain itu, terdapat data tambahan berupa hasil pengujian sistem-sistem elektronik pendukungnya. Setelah serangkaian data telah didapatkan, dilakukan proses analisis dan selanjutnya membuat tulisan dalam bentuk laporan berisi tahapan-tahapan penelitian hingga kesimpulan hasil penelitian.

Langkah atau tahapan penelitian dirangkum dalam bentuk diagram alur seperti terlihat seperti pada gambar berikut:

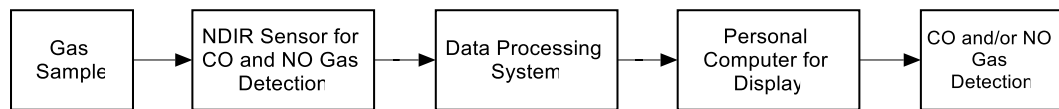


Gambar 3.1 Langkah-langkah Tahapan Penelitian

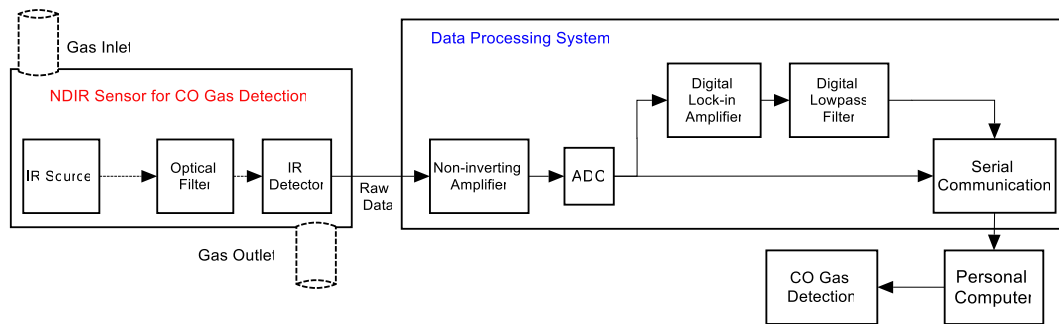
Langkah-langkah penelitian seperti terlihat pada Gambar 3.1 merupakan tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan. Kegiatan penelitian dimulai dari studi literatur hingga penulisan laporan dalam bentuk *paper* dan buku tesis. Berikut ini adalah penjelasan tahapan-tahapan kegiatan penelitian di atas:

3.1 Sistem Sensor NDIR

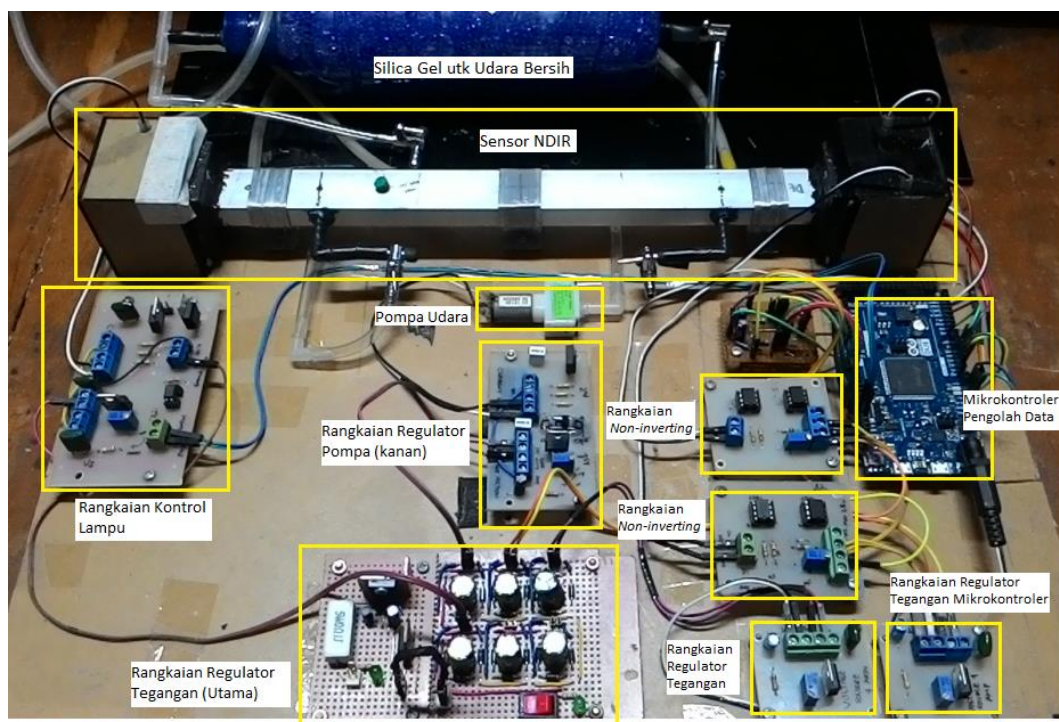
Diagram Sistem Sensor NDIR yang telah dirancang terlihat seperti pada Gambar 3.3 Desain Sistem Sensor NDIR berikut ini:



Gambar 3.2 Tahapan Pengujian Gas CO dan NO Menggunakan Sistem Sensor NDIR



Gambar 3.3 Desain Sistem Sensor NDIR



Gambar 3.4 Aktualisasi Desain Sistem Sensor NDIR

Gambar 3.3 di atas menggambarkan tahapan utama penelitian sistem sensor NDIR sebagai bagian dari desain sistem sensor NDIR ketika melakukan pengujian menggunakan sampel gas yang nyata. Pengujian awal dilakukan dengan

memberikan *input* berupa udara bersih. Setelah mencapai kondisi yang stabil, kemudian sampel diganti gas yang mengandung senyawa gas CO (karbon monoksida) dan NO (nitrogen monoksida) dengan kuantitas dan konsentrasi tertentu. Luaran detektor termopile hasil pengujian pada sensor NDIR kemudian diproses oleh sistem pengolah data dan tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data. Harapannya adalah sistem sensor NDIR mampu mendeteksi dan mengkarakterisasi gas CO dan NO.

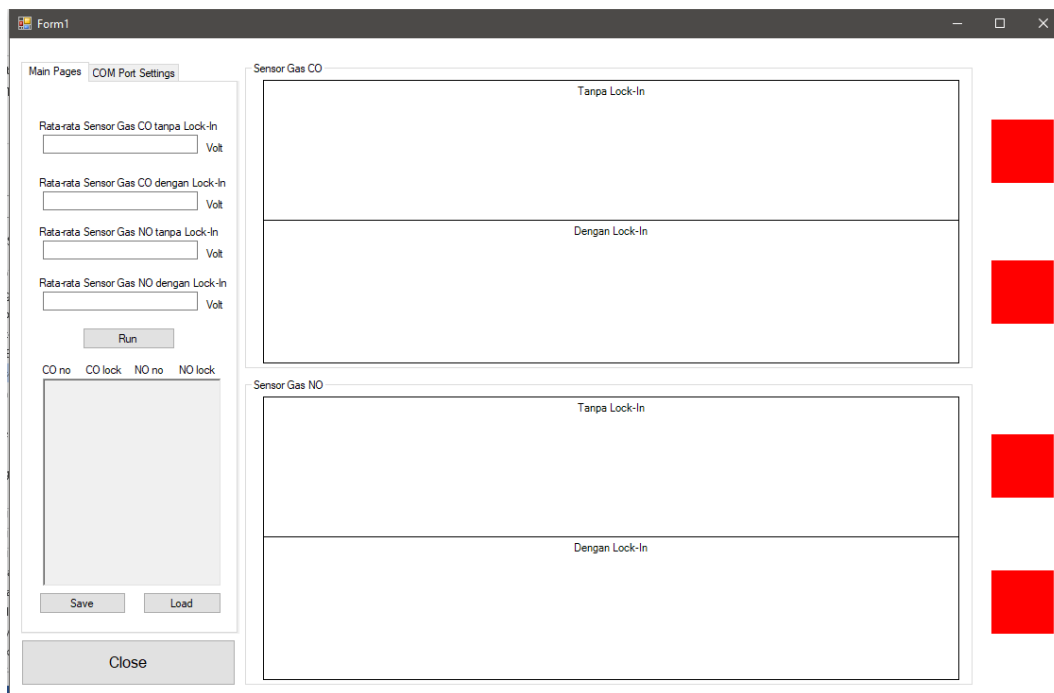
Gambar 3.3 merupakan uraian detail mengenai sistem sensor NDIR untuk pendeteksian gas CO dan NO. Acuan yang digunakan berdasarkan diagram alir utama seperti terlihat pada Gambar 3.3. Penjelasan uraian tersebut dijabarkan sebagai berikut:

1. Sensor NDIR terdiri dari tiga bagian utama yakni, lampu sebagai sumber sinar inframerah, tabung sampel gas (*sample chamber*) dan detektor sinar inframerah termopile. Pengujian pertama dilakukan dengan mengalirkan udara bersih melalui jalur *gas inlet* pada tabung sampel sensor NDIR. Setelah luaran detektor termopile sudah dianggap stabil, sesaat kemudian gas yang mengandung senyawa polutan seperti CO dan NO dimasukkan ke tabung sampel. Tujuan penggunaan udara bersih adalah sebagai basis referensi luaran detektor termopile. Sumber sinar inframerah berasal dari lampu pijar yang dibangkitkan oleh sumber arus dan dapat dikendalikan oleh mikrokontroler.
2. Di dalam tabung sampel, molekul gas CO dan NO kemudian dilewati oleh sinar inframerah yang berasal dari lampu pijar. Kemudian sinar inframerah melewati filter optik untuk proses filterisasi panjang gelombang yang sesuai dengan karakteristik senyawa gas CO dan NO. Panjang gelombang selain panjang gelombang karakteristik molekul gas CO dan NO diabaikan. Setelah melewati filter optik, sinar inframerah yang lolos kemudian menuju detektor termopile hasilnya adalah detektor mengeluarkan respon dalam bentuk tegangan.

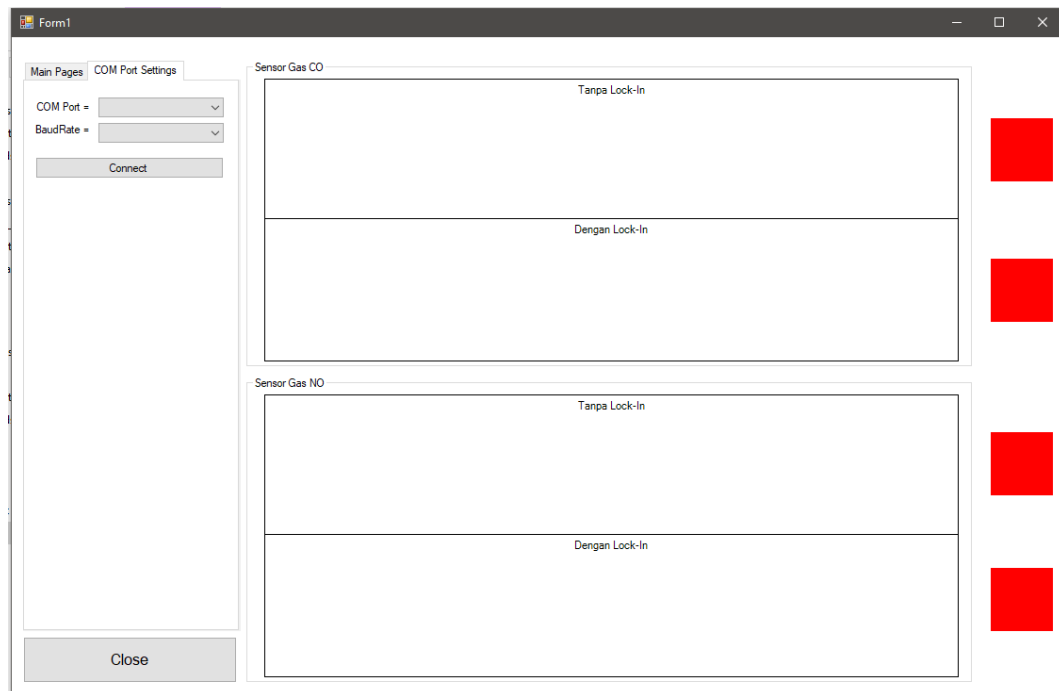
3. Respon tegangan tersebut merupakan data mentah yang besarnya proporsional dengan intensitas sinar inframerah yang diterima. Tegangan *output* kemudian diperkuat menggunakan rangkaian penguat *non-inverting* dengan tujuan agar dapat dibaca oleh mikrokontroler dan untuk keperluan analisis selanjutnya.
4. Setelah mendapatkan data mentah, langkah selanjutnya terbagi menjadi dua yakni:
 - a. Langkah pertama, tegangan luaran yang telah diperkuat menggunakan penguat *non-inverting* selanjutnya masuk ke pin ADC mikrokontroler untuk dibaca dan diolah. Pada bagian ini, luaran hasil penguatan dibaca langsung oleh mikrokontroler dan data hasil pembacaannya kemudian disimpan.
 - b. Langkah kedua, data yang keluar dari penguat *non-inverting* masih mengandung derau yang menutupi informasi hasil pendeteksian. Derau bersifat mengganggu berasal dari perubahan temperatur lingkungan dan interferensi cahaya lingkungan. Derau yang berasal dari perubahan temperatur lingkungan memiliki frekuensi perubahan yang rendah. Pengolahan data menggunakan penguat *lock-in* berbasis digital terdapat di dalam modul mikrokontroler. Untuk itu, luaran detektor termopile yang terpengaruh derau frekuensi rendah tersebut dibawa ke frekuensi yang tinggi menggunakan penguat *lock-in* dengan referensi sinyal berorde kHz. Setelah luaran penguat *lock-in* kemudian masuk ke filter *band-pass* untuk proses filterisasi (penapisan) yang sesuai dengan karakteristik data yang diinginkan.
5. Komunikasi serial digunakan untuk menghubungkan komputer dengan sistem sensor NDIR. Antarmuka (interface) antara sistem sensor NDIR dan pengguna menggunakan GUI dirancang agar efisien dan sederhana serta tidak menyulitkan pengguna. Bentuk GUI yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 3.5 yang memiliki dua tab halaman. Tab pertama merupakan tampilan utama dari GUI yang berisi tempat untuk menampilkan respon detektor termopile yang digunakan pada sensor NDIR. Respon detektor

berupa tegangan dalam bentuk grafik dan angka rata-rata. Di sebelah kanan laman GUI terdapat indikator berwarna merah berbentuk persegi. Indikator tersebut akan berubah menjadi warna hijau ketika terdapat perbedaan respon pada detektor termopile setelah membandingkan antara referensi udara bersih dan ketika dilewati oleh gas. Harapannya adalah ketika sensor NDR dilewati oleh gas, respon detektor akan turun jika dibandingkan dengan referensi udara bersih.

Sedangkan pada Gambar 3.6 adalah tampilan tab *COM Port Setting* pada GUI. Di halaman tab ini, terdapat bagian pengaturan *COM Port* dan *Baud Rate* yang digunakan untuk komunikasi serial dengan mikrokontroler dan tentunya terdapat juga lokasi untuk grafik respon detektor termopile.



Gambar 3.5 Tampilan Tab Utama pada GUI yang Digunakan



Gambar 3.6 Tampilan Tab *COM Port Setting* pada GUI yang Digunakan

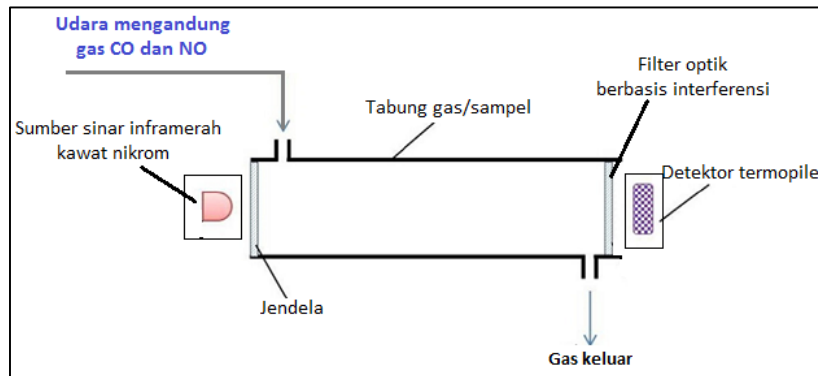
3.2 Perancangan Perangkat Keras dan Program Komputasi Sistem Sensor NDIR

Setelah sistem sensor NDIR dibuat, selanjutnya adalah merancang perangkat keras dan program komputasinya untuk pendeteksian dan menampilkan hasil pendeteksian gas CO dan NO. Bagian yang termasuk perangkat keras antara lain adalah sensor NDIR, sistem rangkaian elektronika, sistem pengolah data. Program komputasi dibuat untuk melakukan pengambilan dan pengolahan data. Pengolahan data terdiri dari proses penguatan dengan *lock-in*, penyaringan (*filterisasi*) dan menampilkan hasil pengolahan data ke monitor

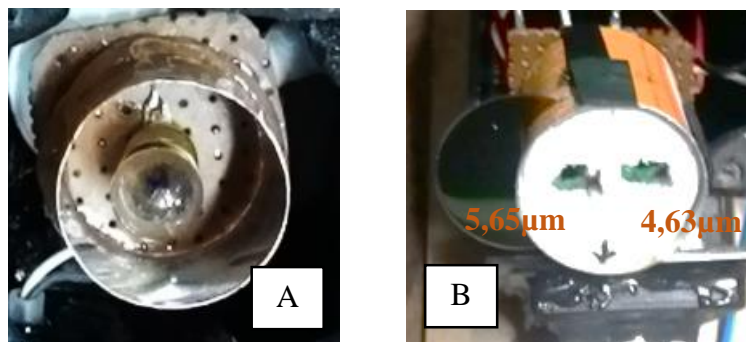
3.2.1 Sensor NDIR

Sensor NDIR yang dibangun memiliki empat bagian penting yakni sumber sinar inframerah, tabung sampel, detektor termopile dan filter optik berbasis interferometrik. Sumber sinar inframerah berasal dari lampu pijar. Lampu pijar diperdaya oleh sumber arus yang bisa dikendalikan oleh mikrokontroler. Tabung sampel yang digunakan berbahan logam aluminium campuran dan dikondisikan

tertutup dari pengaruh gangguan sinar luar. Skematik rancangan sensor NDIR terlihat pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Skematik Rancangan Desain Sensor NDIR

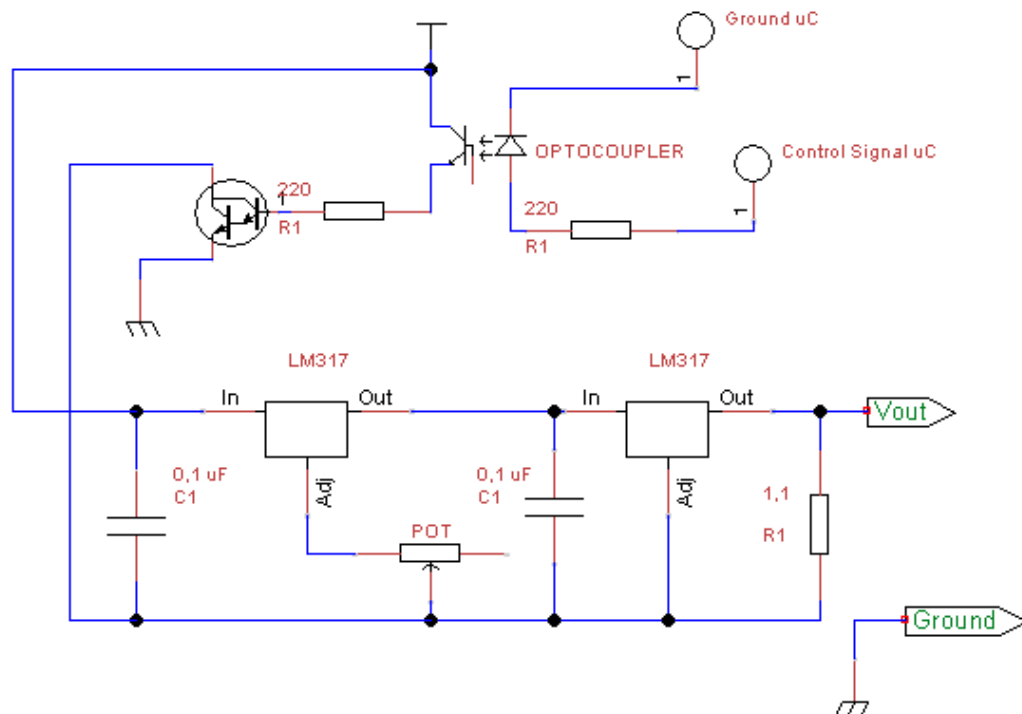


Gambar 3.8 (A) Lampu yang Digunakan Sebagai Sumber Cahaya Inframerah. (B) Filter Optik Sesuai Karakteristik Gas CO dan NO

Untuk mendeteksi sinar inframerah yang melewati tabung sampel, digunakan detektor termopile berbahan dasar silikon satu *channel*. Detektor termopile ditempatkan di belakang filter optik seperti pada Gambar 3.8 (B). Pada gambar tersebut juga diperlihatkan filter optik untuk tujuan pendeteksian gas CO dan NO yang memiliki karakteristik sesuai dengan kedua macam gas tersebut. Tabung sampel yang digunakan untuk pengukuran memiliki dimensi P x L x T masing-masing 30cm x 2,5cm x 1,2cm sehingga volumenya adalah 90cm³ atau 90ml.

3.2.2 Sumber Daya Lampu Menggunakan Sumber Arus

Sumber arus digunakan menyalakan lampu yang digunakan sebagai sumber sinar inframerah. Oleh karena lampu adalah filamen dan kemampuannya dipengaruhi oleh suhu dan hambatan, maka perlu dipertimbangkan untuk menggunakan sumber arus. Dengan menggunakan sumber arus, diharapkan nyala lampu menjadi konstan seiring berjalannya waktu selama proses pengujian dilakukan. Rangkaian sumber arus yang digunakan adalah berbasis IC LM 317T dan dapat dikendalikan oleh mikrokontroler. Rangkaian tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut ini:

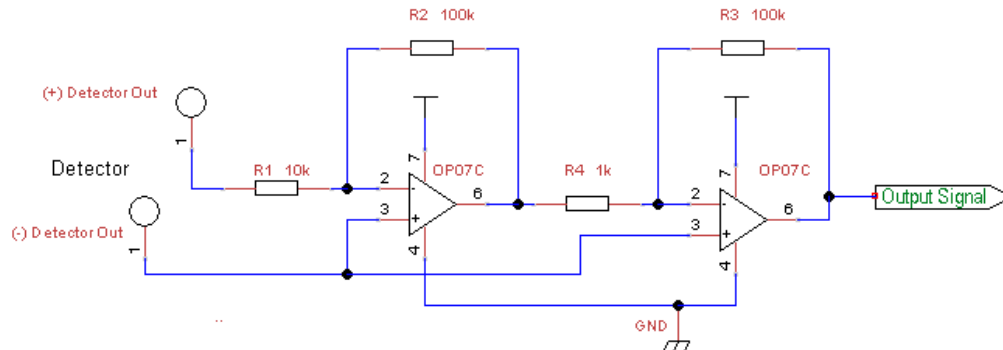


Gambar 3.9 Rangkaian Sumber Daya untuk Sumber Sinar Inframerah

3.2.3 Sistem Pengolah Data

Sistem pengolah data terdiri dari rangkaian penguat *non-inverting*, penguat *lock-in* dan filter *band-pass*. Rangkaian penguat *non-inverting* disusun dari gabungan dua rangkaian penguat *inverting* analog dan terpisah dari mikrokontroler. Sedangkan mikrokontroler digunakan untuk proses pengambilan, pembacaan dan

perhitungan data respon detektor. Ditambah lagi terdapat sistem penguat *lock-in* digital dan penghubung antar muka ke komputer.



Gambar 3.10 Rangkaian Penguat *Non-Inverting*

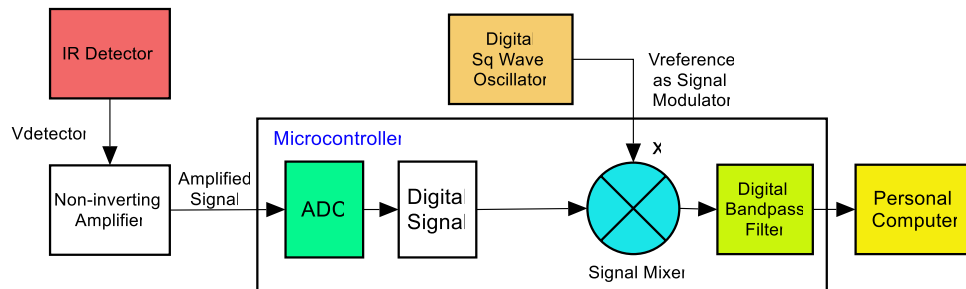
Rangkaian penguat *non-inverting* digunakan untuk memperkuat luaran/output tegangan yang berasal dari detektor termopile. Selanjutnya, sinyal hasil penguatan masuk ke penguat *lock-in* dengan harapan agar nilai SNR naik dan mendapatkan informasi asli dari pengujian. Tahap selanjutnya adalah melakukan proses penapisan (filterisasi) dengan menggunakan BPF berbasis digital.

Penguat *lock-in* yang tersedia adalah berbasis digital dengan menggunakan mikrokontroler yang sama dengan mikrokontroler utama. Merujuk pada referensi teori dan praktek penerapan seperti pada penelitian yang telah dilakukan oleh [27] akan tetapi mereka menggunakan mikrokontroler berbasis STM32F4. Pada penelitian ini, mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino DUE dan rancangannya ditampilkan seperti pada Gambar 3.11.

Filter digital BPF merupakan kombinasi dari HPF dan LPF yang bertujuan untuk melewatkan frekuensi tinggi dan frekuensi rendah. Harapannya adalah data yang didapatkan sudah terbebas dari derau berfrekuensi rendah. Filter BPF yang digunakan adalah berbasis digital dan rekursif dengan nilai pembilang (*nominator*) dan penyebut (*denominator*) sebagai bagian dari persamaan beda. Konstanta pada persamaan beda diketahui dengan menggunakan bantuan *software* Matlab setelah memasukkan karakteristik filter yang diinginkan.

Setelah melalui proses penguatan dengan bantuan penguat *lock-in*, tahap selanjutnya adalah merupakan tahap akhir yakni menampilkan hasil pengolahan

data ke layar monitor komputer dengan memanfaatkan komunikasi serial sebagai penghubung dari Arduino IDE.



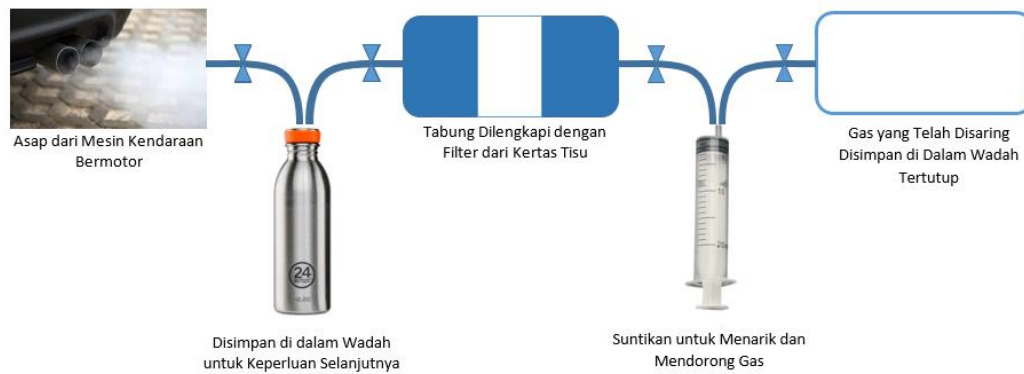
Gambar 3.11 Rancangan Rangkaian Penguat *Lock-in* yang akan diterapkan di Arduino DUE

3.3 Proses Pengujian Sistem Sensor NDIR dan Pengambilan Data

Proses pengujian dan pengambilan data yang dilakukan adalah dengan mengambil luaran dari tiap sistem-sistem penyusunnya. Proses pengujian sistem sensor NDIR untuk mendeteksi gas CO dan NO terbagi menjadi subjudul sesuai dengan bagian-bagian pada sistem penyusunnya. Pada penelitian ini, perlu ditetapkan nilai batas rendah konsentrasi gas CO dan NO dimana masing-masing 50 ppm untuk gas CO dan 25 ppm untuk gas NO. Kedua nilai tersebut berdasarkan referensi yang terdapat di bagian kajian pustaka.

3.3.1 Proses Pengambilan Gas untuk Pengujian

Gambar 3.12 memperlihatkan langkah-langkah yang digunakan pada proses pengambilan dan penyimpanan gas untuk keperluan pendeteksian gas CO dan NO. Sedangkan Gambar 3.13 (A) dan (B) memperlihatkan komponen yang digunakan untuk penyimpanan dan penyaringan gas.



Gambar 3.12 Langkah-langkah Pengambilan Gas.



A



B

Gambar 3.13 (A) Tempat penyimpanan gas sementara. (B) Selang Berbentuk Tabung Dilengkapi dengan Filter Kertas Tisu

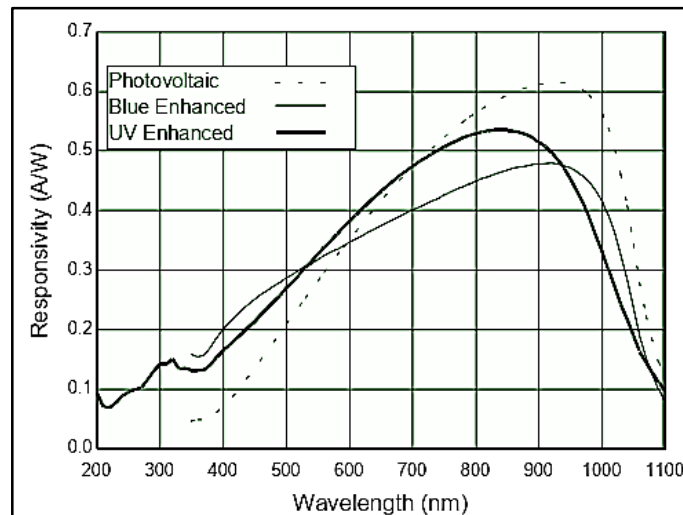
3.3.2 Pengujian Sumber Daya untuk Sumber Sinar Inframerah

Sumber sinar inframerah berasal dari lampu pijar. Lampu tersebut dapat bekerja dengan menggunakan sumber arus maupun sumber tegangan. Sebelum menentukan rangkaian mana yang dipilih untuk lampu, perlu dilakukan tahap prapengujian. Tahapan ini dilakukan dengan menggunakan detektor fotodiode sebagai sensor cahaya dari lampu tersebut.

Tahap ini bertujuan untuk melihat perbandingan ketika menggunakan sumber arus dan sumber tegangan. Pemilihan detektor fotodiode dilakukan setelah

melewati pertimbangan bahwa komponen ini memiliki respon (responsivitas) yang cepat terhadap perubahan intensitas cahaya. Intensitas cahaya berubah-ubah karena tegangan atau arus yang melewati lampu pijar diatur-aturl sedemikian rupa.

Karakteristik umum respon fotodiode silikon dapat dilihat pada Gambar 3.14 berikut:



Gambar 3.14 Karakteristik Umum Responsivitas Berbagai Macam Fotodiode Planar Terdifusi Terhadap Panjang Gelombang [31]

Besarnya responsivitas yang didefinisikan sebagai rasio antara arus cahaya dan daya sinar datang pada panjang gelombang tertentu. Persamaan tersebut dapat dilihat pada persamaan 3.1 berikut ini:

$$R = \frac{I_p}{P} \quad (3.1)$$

Dengan kata lain, responsivitas merupakan ukuran tingkat keefektifan hasil konversi daya sinar lampu menjadi arus listrik yang muncul. Berdasarkan Gambar 3.14, besarnya nilai responsivitas dipengaruhi oleh panjang gelombang sinar datang dan sebagaimana juga dengan bias terbalik juga suhu [31].

3.3.3 Pengujian Sensor NDIR dengan Rangkaian Penguat *Non-inverting*

Tahap awal pengujian sensor NDIR dilakukan dengan memasukkan sampel berupa udara bersih. Ketika respon detektor termopile yang berada di sensor NDIR sudah menunjukkan luaran yang stabil, kemudian dilakukan pengujian

dengan sampel gas yang lain. Pengujian dengan sampel gas yang mengandung senyawa gas CO dan NO dilakukan seperti halnya melewati sampel udara bersih ke dalam tabung sampel. Gas tersebut kemudian dilewatkan oleh sinar inframerah yang berasal dari lampu pijar dan ditangkap oleh detektor termopile. Harapannya adalah dengan memasukkan kuantitas dan konsentrasi gas yang berbeda, respon detektor termopile ikut berbeda.

3.3.4 Pengujian Sensor NDIR dengan Rangkaian Penguat *Lock-in*

Pengujian dilakukan dengan langkah yang identik seperti pada langkah di 3.3.2. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan hasil pengujian yang lebih baik. Sinyal luaran yang berasal dari penguat *non-inverting* sebelumnya dianggap masih terganggu oleh derau sehingga informasi asli hasil pendeteksian menjadi sulit dikenali. Harapannya yakni setelah mengaplikasikan penguat *lock-in*, data hasil pengujian sensor NDIR sudah terbebas dari gangguan derau sehingga informasi hasil pengujian yang optimal bisa didapatkan.

3.4 Analisis Data Hasil Pengujian

Analisis data hasil pengujian dilakukan untuk melihat kesesuaian antara data yang didapatkan dengan referensi yang digunakan. Jika terdapat perbedaan hasil meskipun telah melakukan prosedur yang benar, maka perlu mencari solusi dan alasan yang tepat untuk menjawab permasalahan tersebut.

3.5 Penulisan Laporan

Laporan dibuat dalam bentuk *paper* dan buku tesis merupakan langkah terakhir dari penelitian dan disusun secara sistematis. Paper dibuat dengan ringkas dan tidak membahas keseluruhan bagian penelitian. Sedangkan buku tesis terdiri dari lima bab yakni pendahuluan, teori dasar, metode penelitian, hasil dan pembahasan/analisis dan kesimpulan.

BAB 4

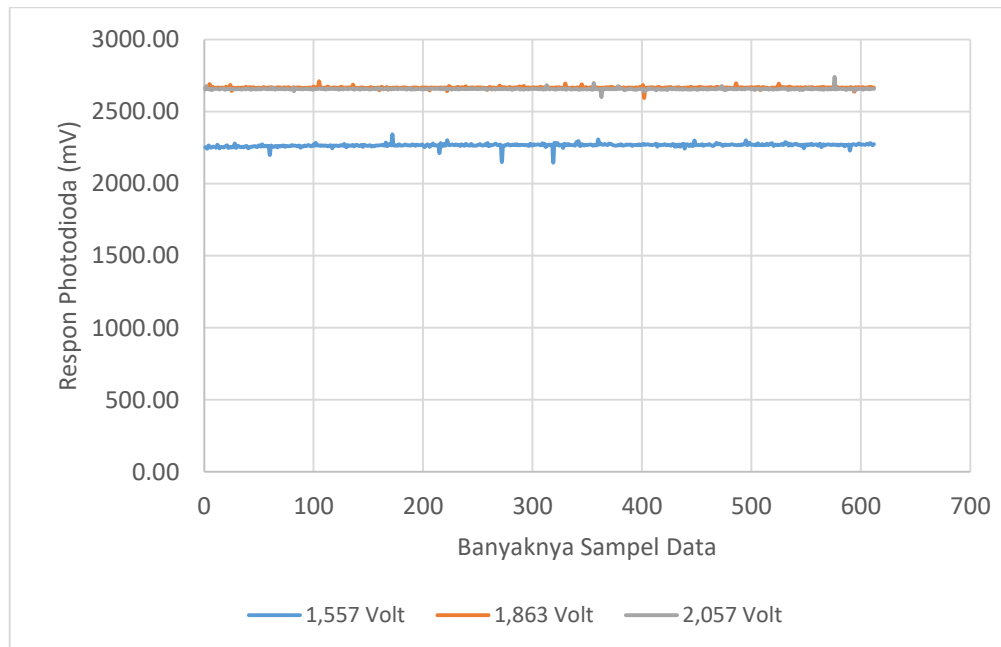
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil dari keseluruhan rangkaian kegiatan penelitian. Termasuk di dalamnya adalah tentang persiapan yang dilakukan sebelum melangkah ke bagian penelitian utama. Setelah hasil didapatkan, kemudian dilakukan pembahasan mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan.

4.1 Sumber Daya untuk Lampu Pijar

Pengujian ini merupakan bagian dari tahap prapengujian karena dilakukan dengan menggunakan detektor fotodioda. Pada tahap ini, hasil respon yang didapatkan adalah dengan membandingkan penggunaan sumber daya yang berasal dari sumber tegangan (*voltage source*) dan sumber arus (*current source*).

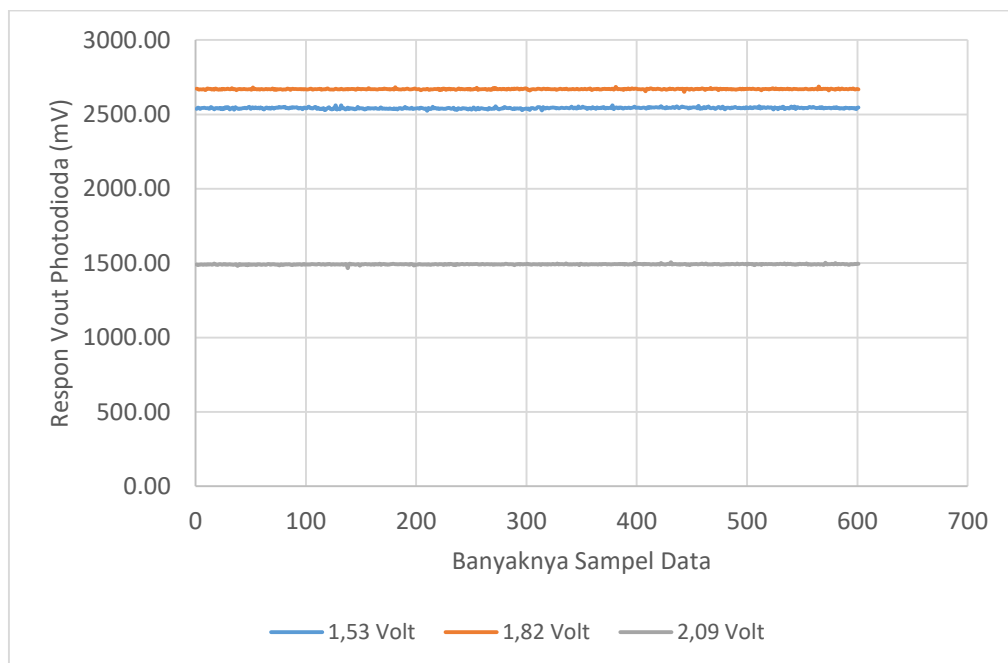
Gambar 4.1 di bawah adalah respon fotodioda ketika diberikan sumber daya yang berasal dari sumber tegangan (*voltage source*) dengan variasi nilai tegangan yang berbeda.



Gambar 4.1 Respon Vout Photodioda Dengan Sumber Daya Lampu Menggunakan Sumber Tegangan (*Voltage Source*)

Dengan mengikuti data seperti pada Gambar 4.1 di atas, masing-masing data menghasilkan standar deviasi bernilai 11.21, 5.81 dan 5.55 untuk sumber daya lampu menggunakan sumber tegangan (*voltage source*) sebesar 1.557, 1,863 dan 2.057 Volt. Dengan informasi yang didapatkan seperti sebelumnya, diketahui bahwa semakin naiknya tegangan, standar deviasi semakin menurun. Selanjutnya digunakan perbandingan yang identik dengan menggunakan sumber arus sebagai sumber daya bagi lampu.

Sedangkan untuk sumber daya menggunakan sumber arus (*current source*) adalah seperti pada Gambar 4.2 di bawah ini:



Gambar 4.2 Respon Vout Photodiode Dengan Sumber Daya Lampu Menggunakan Sumber Arus (*Current Source*)

Pada grafik di Gambar 4.2, sumber daya untuk lampu berupa sumber arus (*current source*) yang digunakan memiliki tegangan masing-masing 1.53 (196mA), 1.82 (215mA) dan 2.09 (229mA) Volt. Respon tegangan fotodiode dengan keterangan seperti disebutkan sebelumnya memiliki standar deviasi masing-masing sebesar 4.79, 2.80, 2.60. Bila membandingkan respon fotodiode dengan sumber daya lampu berupa sumber tegangan dan sumber arus, nilai standar deviasi yang

rendah terjadi jika menggunakan sumber arus. Adapun, untuk tegangan sumber daya lampu bernilai lebih dari 1.5 Volt, nilai standar deviasi menunjukkan penurunan yang cukup signifikan jika menjadikan tegangan 1.5 Volt sebagai acuannya.

Akan tetapi, hal yang unik terjadi pada sumber daya berupa sumber arus dengan tegangan 2,09 Volt. Respon fotodioda tercatat berada di bawah dua nilai yang ikut diukur. Hal ini dapat terjadi karena adanya saturasi akibat keterbatasan mikrokontroler dalam membaca data respon fotodioda karena Vout cukup tinggi melampaui spesifikasi modul mikrokontroler.

Dengan demikian, sumber daya menggunakan sumber arus (*current source*) tetap dapat digunakan akan tetapi perlu memperhatikan tegangan yang digunakan untuk lampu. Berdasarkan informasi di atas, tegangan 1.8 Volt (215mA) bisa digunakan untuk menyalakan lampu yang digunakan sebagai sumber sinar inframerah.

4.2 Karakteristik Umum Detektor Termopile

Detektor termopile dibekali dengan termistor NTC yang mana memiliki karakteristik yakni resistansinya menurun *non-linear* seiring dengan naiknya suhu. Mengikuti *datasheet* sebagai referensi, plot grafik resistansi terhadap suhu dalam kondisi normal ditunjukkan seperti pada Gambar 4.3. Berdasarkan informasi tersebut, hubungan antara dua variabel tersebut adalah *non linear* dan formulasi yang terbentuk dari hubungan dua variabel tersebut adalah:

$$y = 89364 e^{-0.042x} \quad (4.1)$$

$$\text{atau} \quad x = -\left(\frac{\ln y - \ln 89364}{0,042}\right) \quad (4.2)$$

Dimana nilai y adalah resistansi dan x adalah suhu. Pada saat suhu ruangan sekira $27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ diukur menggunakan termometer alkohol, nilai hambatan pada thermistor A1 dan A2 masing-masing bernilai $28,75\text{k}\Omega$ dan $27,75\text{k}\Omega$. Selanjutnya, dengan mengikuti formulasi Steinhart-Hart yang mana memiliki bentuk sbb:

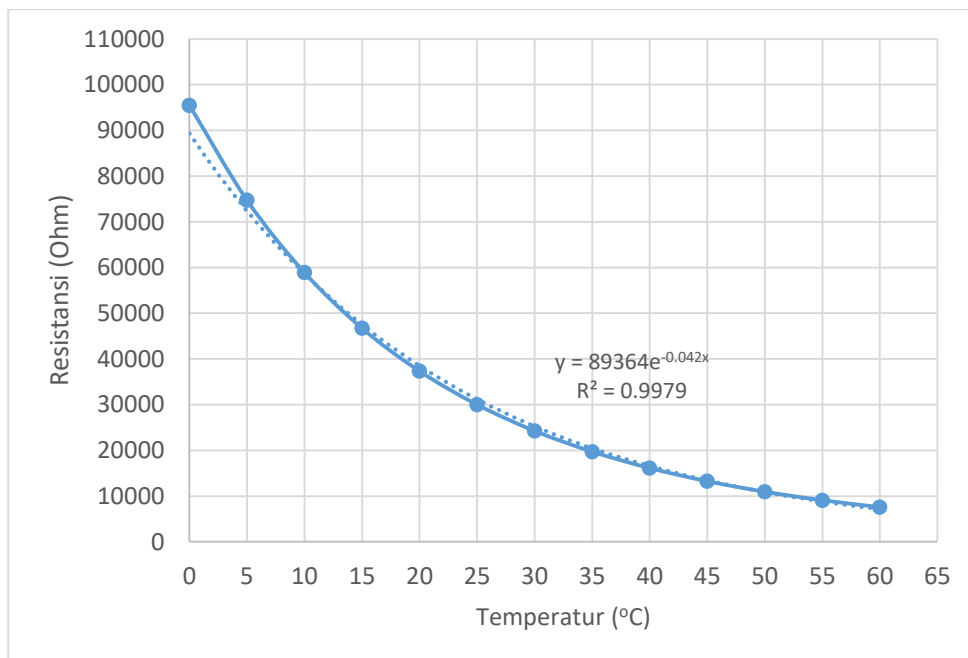
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \quad (4.3)$$

Ditambah dengan informasi yang didapatkan sebelumnya, maka

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{300} + \frac{1}{3964} \ln \left(\frac{28,752k\Omega}{27,85k\Omega} \right)$$

$$\frac{1}{T} = 3,341 \cdot 10^{-3}$$

$$T = 299,27 \text{ K atau } 26,26^\circ \text{C}$$



Gambar 4.3 Resistansi vs Temperatur pada Thermistor

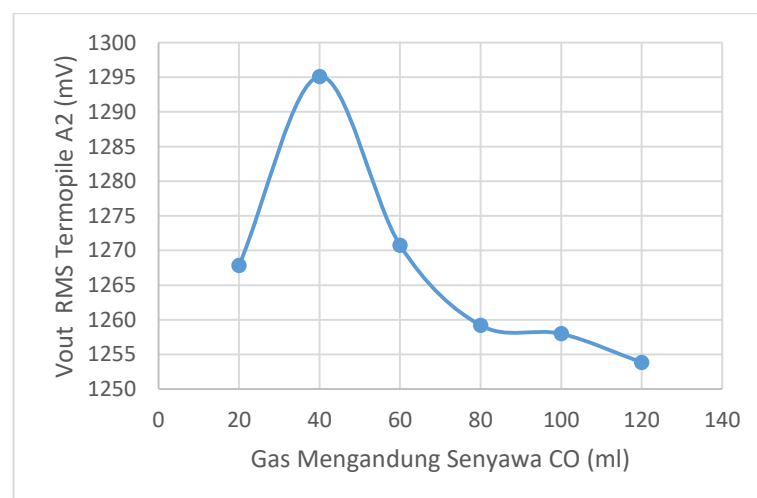
Dengan adanya informasi nilai resistansi vs temperatur, diharapkan bisa mendapatkan nilai konstanta agar respon termopile dan termistor memiliki derajat yang sama. Pada saat yang bersamaan, detektor termopile memiliki nilai $\alpha = 0,06 \text{ V/K}$ yang berarti bahwa tiap ada perbedaan temperatur sebesar 1 Kelvin, maka detektor akan membangkitkan tegangan luaran sebesar 0,06V.

4.3 Pengujian Sensor NDIR Dengan Sampel Gas Mengandung Senyawa CO dan NO

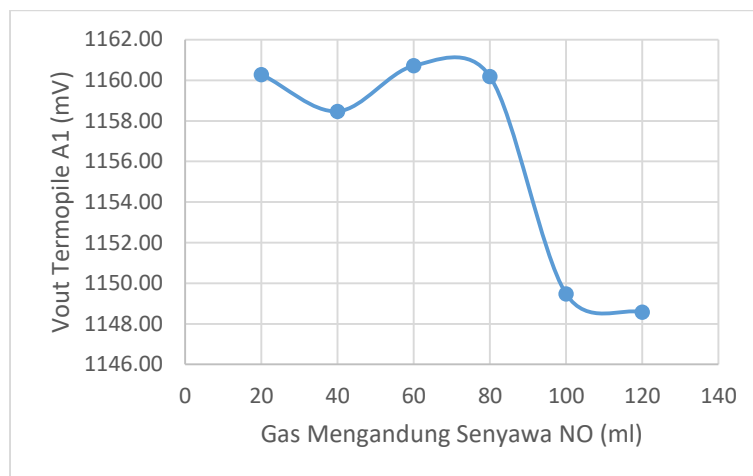
Sebelum melakukan pengujian pendeteksian gas CO dan NO, perlu dilakukan karakterisasi sensor NDIR dengan menggunakan *input* berupa udara bersih dan kemudian mencatat luaran tegangan detektor termopile. Detektor termopile A1 untuk pendeteksian gas NO dan termopile A2 untuk pendeteksian gas CO. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan respon termopile dan menjadikannya sebagai nilai referensi untuk pendeteksian gas CO dan NO. Hasil respon rata-rata pada pengujian dengan menggunakan udara bersih masing-masing untuk termopile A1 dan A2 adalah 1134,51mV dan 1259,59mV. Lebih lengkapnya terlihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Respon Detektor Termopile Ketika Dialirkan Udara Bersih

Percobaan	Vout RMS	Vout RMS
Ke-	Termopile A1 (mV)	Termopile A2 (mV)
1	1100,23	1263,47
2	1131,65	1273,58
3	1149,60	1256,61
4	1156,56	1244,70
Rata-rata	1134,51	1259,59



Gambar 4.4 Respon Detektor Termopile A2 Pada Sensor NDIR



Gambar 4.5 Respon Detektor Termopile A1 Pada Sensor NDIR

Gambar 4.4 menunjukkan grafik respon detektor termopile pada sensor NDIR ketika melakukan pengujian langsung pada sensor tersebut. Sensor NDIR diberikan gas yang mengandung senyawa CO dengan volume yang berbeda-beda. Gas disuntikkan ke dalam tabung sampel tahap demi tahap dengan volume tiap suntikan adalah 20ml. Luaran yang didapatkan yakni, pada rentang volume 40 hingga 120 ml, respon detektor termopile menunjukkan penurunan tegangan. Akan tetapi hal tersebut tidak terjadi pada volume 20 ml dimana besarnya nilai respon termopile lebih kecil dibandingkan dengan volume 40ml. Sampel gas yang digunakan berasal dari asap kendaraan bermesin bensin.

Pengujian langsung lainnya ketika sensor NDIR diberikan gas mengandung senyawa NO dan responnya terlihat pada Gambar 4.5. Pada gambar tersebut, terjadi penurunan tegangan termopile A1 ketika volume gas yang diberikan berada pada rentang 60 hingga 120 ml. Sedangkan untuk volume lebih kecil dari 60 ml, respon detektor termopile A1 cenderung bergerak tidak stabil. Kondisi tidak stabil seperti yang ditunjukkan oleh grafik dapat terjadi karena adanya gangguan yang berasal dari lingkungan sekitar. Sampel gas yang digunakan berasal dari asap kendaraan bermesin diesel.

4.3.1 Pengujian Sensor NDIR Dengan Sampel Gas Kuantitas Besar

Di bawah ini adalah data hasil pengujian sensor gas NDIR dengan menggunakan sampel gas bersumber dari asap kendaraan bermotor bermesin bensin. Sampel gas yang digunakan memiliki kuantitas yang lebih besar jika dibandingkan pengujian-pengujian sebelumnya. Penggunaan sampel gas dengan kuantitas yang besar diharapkan bisa menunjukkan perbedaan yang signifikan pada luaran detektor termopile di sensor NDIR. Termopile A1 merupakan detektor untuk gas NO dan termopile A2 merupakan detektor untuk gas CO.

Tahap awal sensor NDIR adalah melewati udara bersih ke dalam tabung sampel. Selanjutnya adalah memasukkan sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermotor bermesin bensin ke dalam tabung sampel tersebut. Data hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2 Data Pengujian Sensor NDIR Menggunakan Sampel dari Asap Mesin Bensin

Sampel Gas	Vout RMS Termopile A1 (mV)	Vout RMS Termopile A2 (mV)
Udara Bersih	757,16	1213,72
Percobaan ke-1	756,61	1209,62
Percobaan ke-2	754,90	1208,70
Percobaan ke-3	754,90	1207,61
Percobaan ke-4	754,18	1207,38

Data sensor yang ditampilkan pada Tabel 4.2 merupakan nilai tegangan detektor yang dibaca oleh mikrokontroler. Percobaan pertama hingga ke-4 menghasilkan nilai rata-rata tegangan luaran RMS sebesar 755,14 mV untuk termopile A1 dan 1208,32 mV untuk termopile A2. Kedua nilai rata-rata tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai rata-rata luaran RMS ketika diberikan udara bersih (baris pertama).

Setelah melakukan pengujian menggunakan sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermesin bensin, kemudian sensor NDIR diujicobakan

menggunakan sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermesin diesel. Hasil pengukuran langsung dituliskan dalam bentuk tabel berikut ini:

Tabel 4.3 Data Pengujian Sensor NDIR Menggunakan Sampel dari Asap Mesin Diesel

Sampel Gas	Vout RMS Termopile A1 (mV)	Vout RMS Termopile A2 (mV)
Udara Bersih	1155,6	1403,2
Percobaan ke-1	1175,45	1393,51
Percobaan ke-2	1173,52	1391,57
Percobaan ke-3	1129,28	1343,11
Percobaan ke-4	1129,76	1345,06

Merujuk pada data yang ditampilkan di Tabel 4.3 terlihat bahwa masing-masing detektor termopile A1 dan A2 memiliki kecenderungan turun untuk percobaannya. Untuk termopile A1, nilai luaran detektor memiliki kecenderungan menurun untuk percobaan pertama hingga percobaan ke-3 dan tidak berlaku untuk percobaan ke-3 dan ke-4. Nilai luaran termopile untuk percobaan pertama dan ke-2 memiliki nilai lebih besar daripada saat udara bersih. Pada termopile A2, nilai luaran detektor pada percobaan masih lebih kecil dibandingkan dengan luaran pada saat udara bersih. Namun kecenderungan nilai turun tidak berlaku untuk percobaan ke-3 dan ke-4.

4.4 Pengujian Sistem Sensor NDIR Dengan Penguat *Lock-in*

Respon detektor di sensor NDIR yang telah didapatkan seperti ditunjukkan oleh gambar-gambar sebelumnya diplot dalam satuan mV dan merupakan V_{rms} . Oleh karena itu, untuk lebih mengefektifkan hasil pengukuran, diperlukan metode lain yakni penguat *lock-in* untuk mendapatkan hasil pengukuran yang sesuai dengan nilai respon detektor yang sebenarnya.

Sebelum menggunakan penguat *lock-in*, pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk membuktikan dan mematangkan konsep mengenai penguat *lock-in*.

Simulasi dilakukan seperti pada subjudul 4.3.1 dengan menggunakan *software* Matlab yang diantaranya adalah modulasi frekuensi, pencampuran (*mixer*) dan penyaringan (filterisasi) dengan BPF (*band-pass filter*) dan luaran dari penguatan *lock-in*.

4.4.1 Simulasi Penguat *Lock-in* Menggunakan Matlab

Gambar 4.6 memperlihatkan simulasi modulasi sinyal dengan sinyal pesan berfrekuensi 50Hz (atas), frekuensi pembawa sebesar 1 kHz (tengah) dan sinyal hasil modulasi (bawah). Sinyal pesan yang dimodulasi dengan sinyal pembawa (berfrekuensi lebih tinggi) menampilkan hasil berupa sinyal yang frekuensinya mengikuti frekuensi sinyal pembawa.

Simulasi tersebut menggunakan sinyal pesan dan sinyal pembawa yang kemudian digabungkan menjadi satu dengan mengikuti formulasi berikut:

Sinyal pembawa

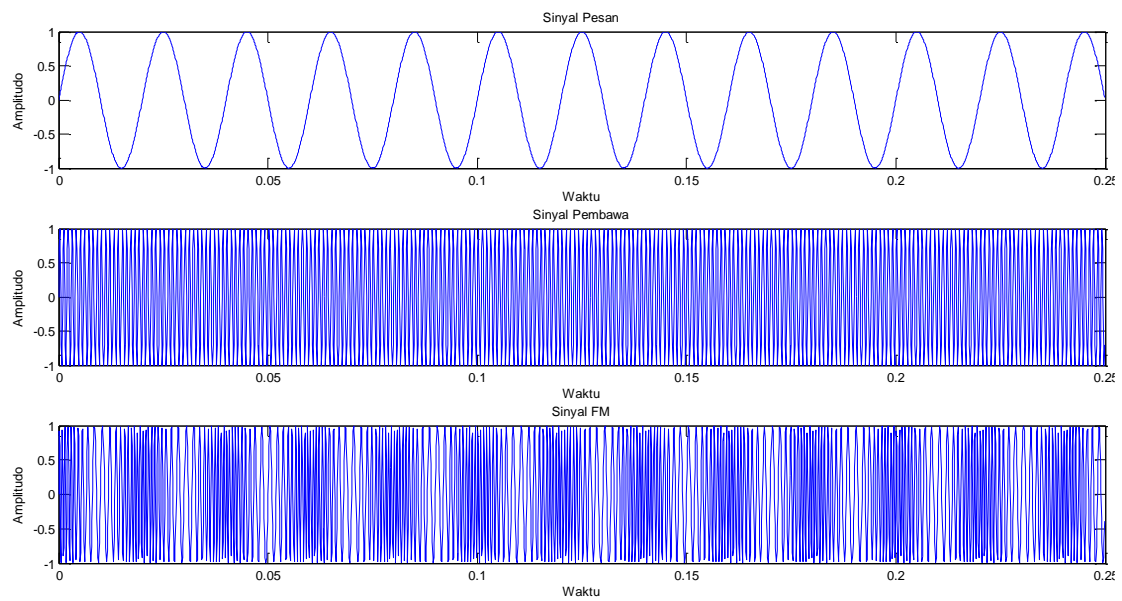
$$X_c(t) = X_c \cos(\Omega_c t) \quad (4.4)$$

Sinyal modulasi

$$X_m(t) = \beta \sin(\Omega_m t) \quad (4.5)$$

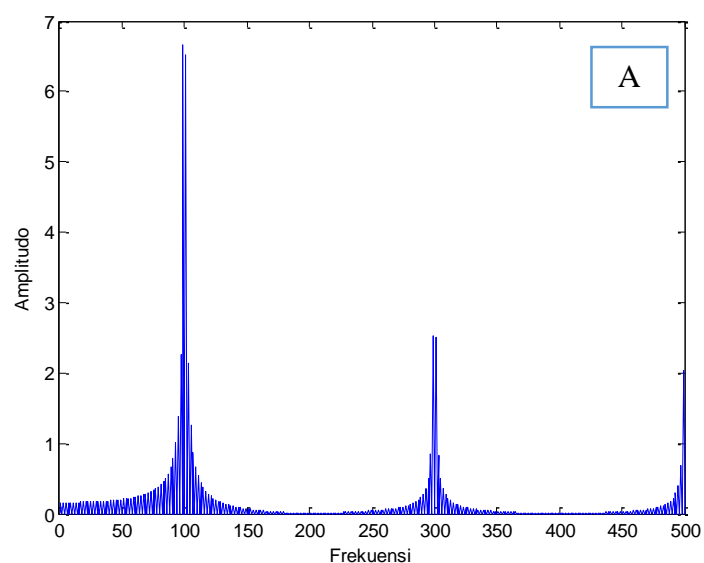
Sinyal setelah dimodulasi

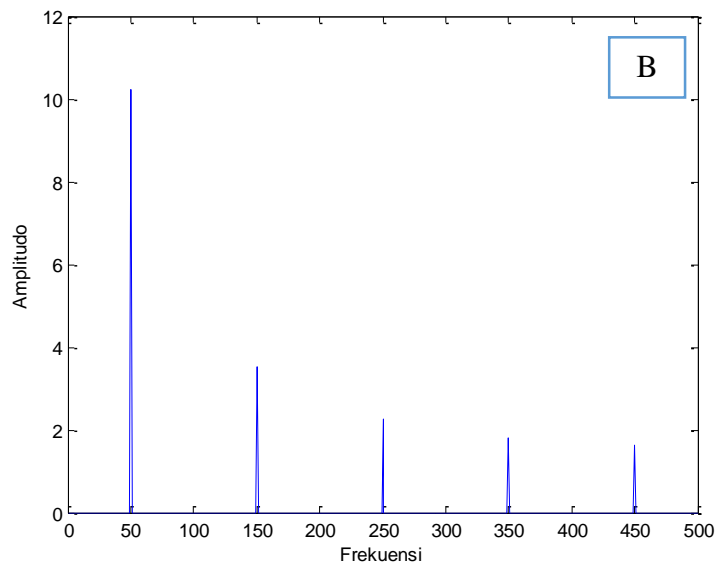
$$X(t) = X_c \cos[\Omega_c t + \beta \sin(\Omega_m t)] \quad (4.6)$$



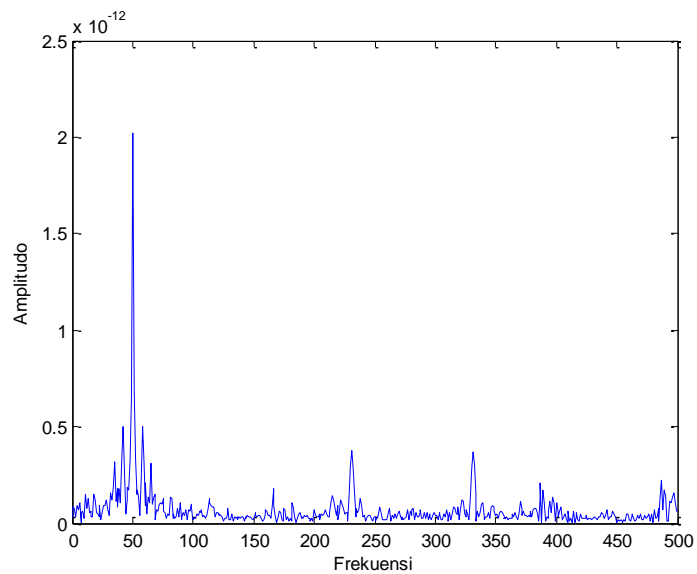
Gambar 4.6 Simulasi Modulasi Frekuensi Sinyal Pesan dengan Sinyal Pembawa Berfrekuensi Lebih Tinggi

Pada Gambar 4.7 (A) berikut merupakan contoh hasil simulasi campuran (*mixing*) dengan menggunakan sumber sinyal kotak berfrekuensi 1 dan 100 Hz. Percobaan simulasi penguat *lock-in* dengan menggunakan Matlab sebelumnya juga pernah dilakukan oleh [32]. Hasil plotnya dituliskan dalam grafik berdomain frekuensi berikut.



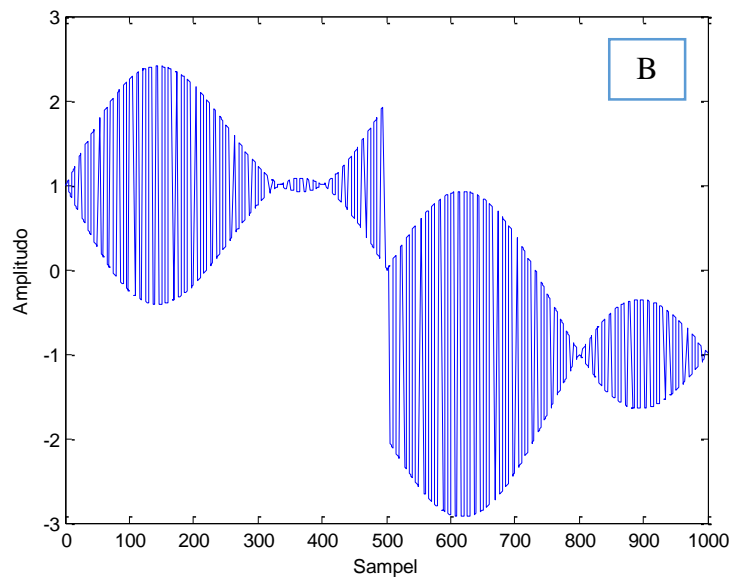
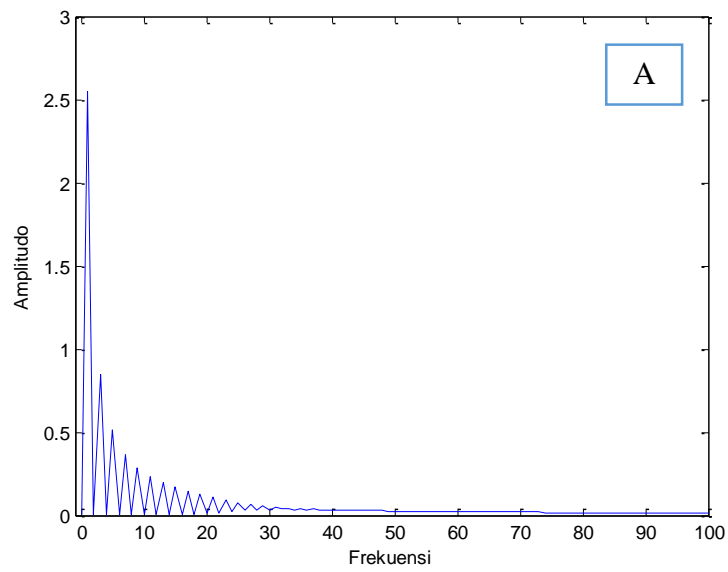


Gambar 4.7 (A) Hasil *Mixing* Sinyal Kotak dengan Frekuensi 1Hz dan 100Hz dan
(B) *Mixing* dengan Frekuensi 50Hz dan 1000Hz

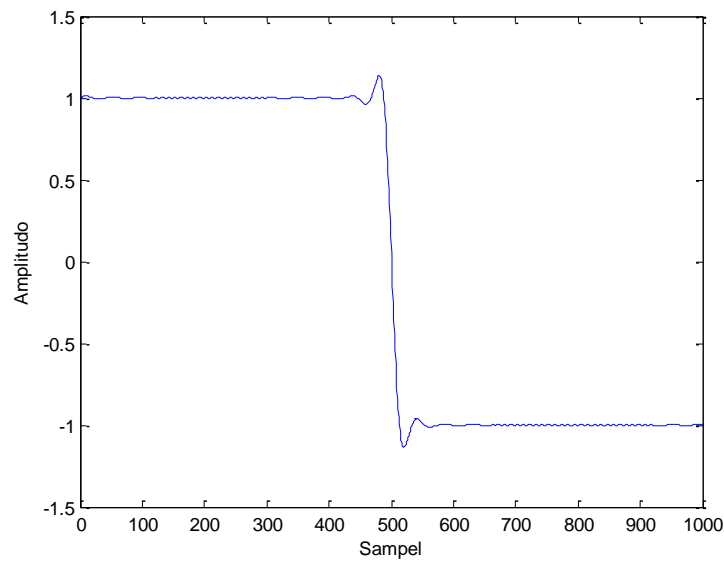


Gambar 4.8 Hasil *Mixing* Sinyal Sinus dengan Frekuensi 50Hz dan 1kHz

Gambar 4.9 (A) menampilkan hasil pencampuran sinyal kotak dengan sinyal derau. Sedangkan Gambar 4.10 menampilkan hasil filterisasi menggunakan mode Butterworth dan frekuensi *cut-off* sebesar 25Hz.



Gambar 4.9 (A) Luaran Hasil Penguat *Lock-in* dan (B) Hasil *Mixing* Antara 2 Sinyal Kotak Frekuensi Berbeda Ditambah Derau



Gambar 4.10 Hasil Penyaringan dengan LPF Mode Butterworth

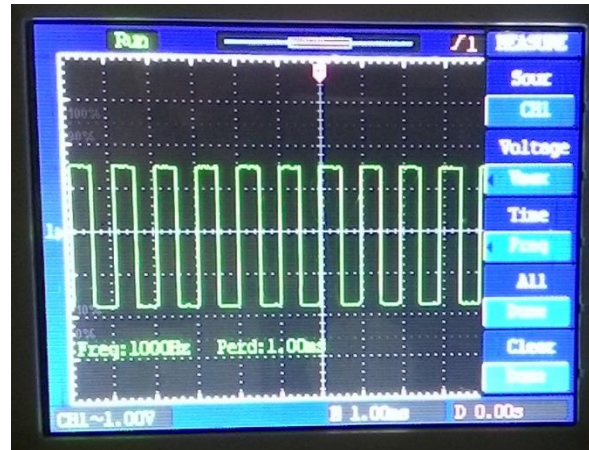
Implementasi hasil simulasi kemudian diterapkan di mikrokontroler Arduino DUE. Program Matlab yang digunakan untuk simulasi ini ditempatkan di lampiran.

4.4.2 Penguat *Lock-in* Pada Sistem Sensor NDIR

Oleh karena derau berfrekuensi rendah dan menengah yang berasal dari lingkungan dapat mengganggu proses pengujian pendeteksian gas CO dan NO, sehingga dibutuhkan suatu teknik yang bertujuan untuk menghilangkan gangguan derau tersebut. Teknik tersebut adalah penguat *lock-in* yang bertujuan untuk mendapatkan informasi asli dari hasil pengujian dengan sensor NDIR.

Penguat *lock-in* membutuhkan suatu sinyal berosilasi tinggi yang digunakan untuk memodulasi sinyal respon dari detektor termopile. Tujuan penggunaan penguat *lock-in* adalah untuk membawa derau berfrekuensi rendah menuju frekuensi yang lebih tinggi. Setelah frekuensinya ditingkatkan, kemudian dilakukan filterisasi dengan *band-pass* filter. Luarannya adalah mendapatkan informasi asli hasil pengujian setelah sebelumnya frekuensi yang tidak diinginkan

telah difilter. Gambar 4.11 memperlihatkan sinyal kotak 1 kHz yang digunakan sebagai referensi dan modulasi sinyal respon detektor.



Gambar 4.11 Sinyal Kotak yang Digunakan untuk *Mixing*

Pada penelitian ini, penguat *lock-in* yang digunakan terdiri dari sinyal referensi modulasi dan filter *band-pass* digital. Filter *band-pass* merupakan gabungan dari dua macam filter, yakni filter *high-pass* dan filter *low-pass*. Untuk menerapkan filter *band-pass*, dibutuhkan fungsi beda (*difference equation*) dengan mengikuti spesifikasi yang diinginkan. Spesifikasi filter *high-pass* adalah orde 1, $f_c = 50\text{Hz}$ dan $f_s = 5000\text{Hz}$ dan *low-pass* adalah orde 1, $f_c = 5\text{Hz}$ dan $f_s = 5000\text{Hz}$. Dengan memasukkan parameter-parameter ke dalam Matlab, maka didapatkan koefisien b dan a untuk dipakai di fungsi beda. Untuk filter *high-pass*, koefisien b dan a adalah:

$$\begin{aligned} b &= 0.9695 \quad -0.9695 \\ a &= 1.0000 \quad -0.9391 \end{aligned}$$

Koefisien b dan a filter *high-pass* kemudian dipakai di fungsi beda seperti pada formula berikut:

$$y(n) = 0,9695 x(n) - 0,9695 x(n - 1) + 0,9391y(n - 1) \quad (4.7)$$

Sedangkan koefisien b dan a untuk filter *low-pass* adalah:

$$\begin{aligned} b &= 0.0031 & 0.0031 \\ a &= 1.0000 & -0.9937 \end{aligned}$$

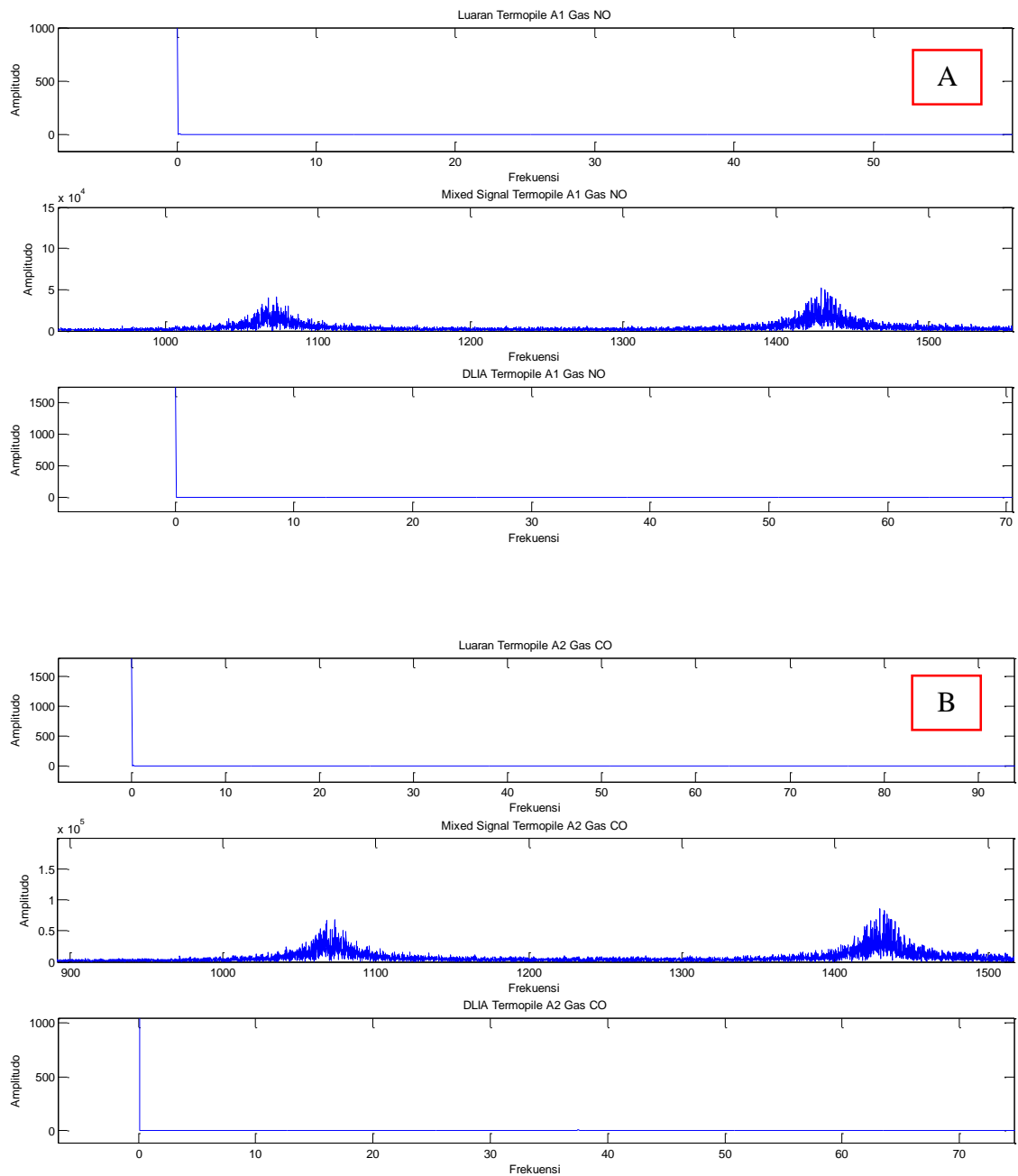
Koefisien b dan a filter *low-pass* kemudian dipakai di fungsi beda seperti pada formula berikut:

$$y(n) = 0,0031 x(n) + 0,0031 x(n - 1) + 0,9937y(n - 1) \quad (4.8)$$

4.4.3 Penerapan Penguat *Lock-in* Pada Sistem Sensor NDIR

Penguat *lock-in* yang telah dirancang kemudian diterapkan pada sistem sensor NDIR. Sebelum melakukan pengujian pendeteksian gas CO dan NO dengan menggunakan sistem sensor NDIR, perlu dilakukan pengujian awal sistem sensor terhadap parameter-parameter lainnya seperti dengan mengalirkan udara bersih ke dalam tabung sampel. Sama seperti pengujian sebelumnya bahwa aliran udara bersih digunakan sebagai referensi luaran detektor termopile pada sensor NDIR. Gambar 4.12 (A) dan (B) adalah masing-masing data gambar respon luaran detektor termopile untuk sensor gas CO dan NO ketika dialiri udara bersih. Tujuan pengambilan data ini adalah untuk melihat frekuensi yang terdapat pada pengujian sistem sensor NDIR. Baris pertama pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 memperlihatkan frekuensi <5Hz sebagai bagian dari informasi amplitudo respon luaran detektor termopile. Sedangkan baris kedua adalah respon luaran detektor ketika dicampur dengan sinyal referensi. Selanjutnya adalah baris ketiga yakni luaran detektor termopile setelah melewati *band-pass* filter.

Berdasarkan data gambar tersebut, respon luaran detektor termopile tidak terpengaruh secara signifikan oleh gangguan di rentang frekuensi <50Hz. Keadaan tersebut berlaku untuk kedua detektor termopile yang digunakan. Hal yang identik terjadi pada respon detektor termopile setelah melewati penguat *lock-in*. Jika membandingkan besarnya amplitudo berdasarkan data gambar tersebut, luaran sensor NDIR efektif bekerja pada frekuensi <10Hz. Meskipun demikian, proses filterisasi harus lebih diperhatikan agar luarannya detektor dapat lebih optimal.



Gambar 4.12 (A) Respon Detektor Untuk Gas NO dan (B) Respon Detektor Untuk Gas CO

4.5 Pendeteksian Gas CO dan NO Menggunakan Sistem Sensor NDIR

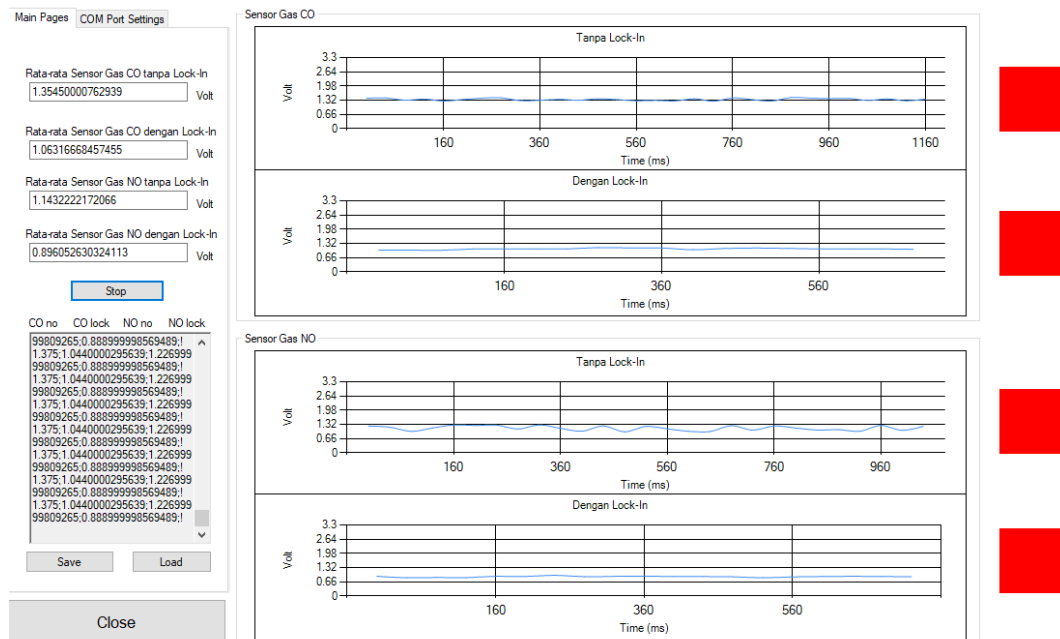
Sistem sensor NDIR yang telah dirancang dan dibangun selanjutnya digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas CO maupun NO. Pendeteksian gas CO maupun NO dilakukan dengan menggunakan GUI yang juga telah dirancang

sebelumnya dengan tujuan sebagai antarmuka manusia-mesin. Sampel gas yang digunakan berasal dari asap kendaraan bermesin bensin dan diesel. Sampel gas yang dipakai adalah sampel dengan kuantitas besar yang dipompa langsung menuju tabung sampel.

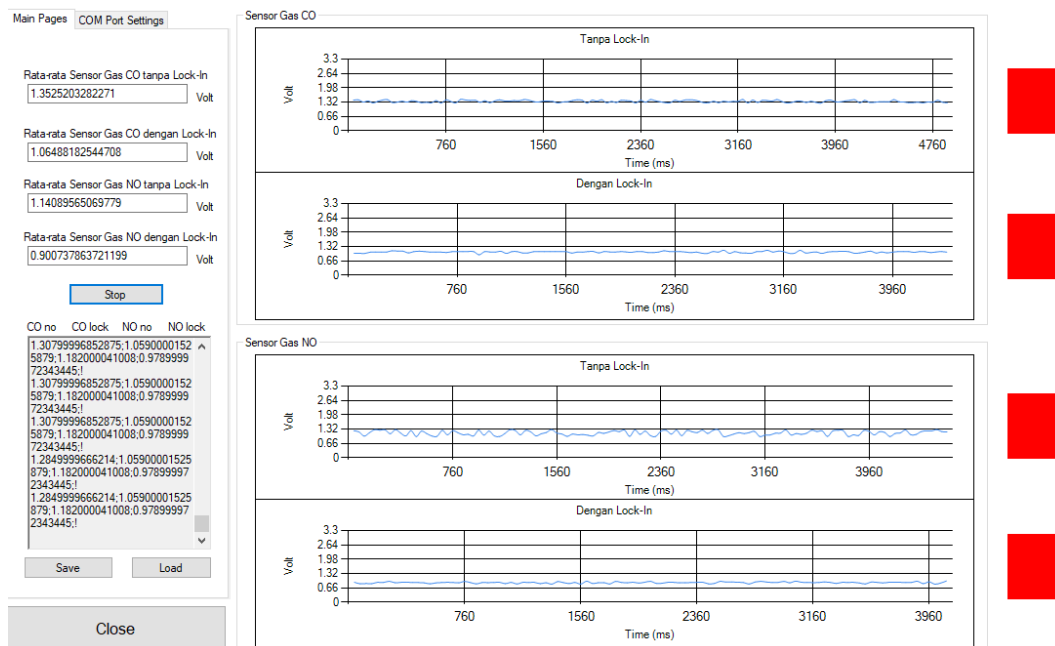
4.5.1 Pendeteksian Menggunakan Sampel Gas Asap Mesin Bensin

Subbab ini melakukan pengujian pendeteksian gas CO dan NO menggunakan sampel gas yang berasal dari asap mesin bensin. Hasil pendeteksian keberadaan gas CO maupun NO ditandai adanya perubahan warna pada indikator persegi di bagian kanan laman utama GUI. Perubahan warna dari merah menjadi hijau ditentukan kepada nilai batasan pengukuran-pengukuran sebelumnya ketika dilewati oleh udara bersih. Sebelum melakukan pengujian pendeteksian gas CO maupun NO dengan menggunakan sampel gas dari asap kendaraan bermotor bermesin bensin, terlebih dahulu melewati udara bersih ke dalam tabung sampel.

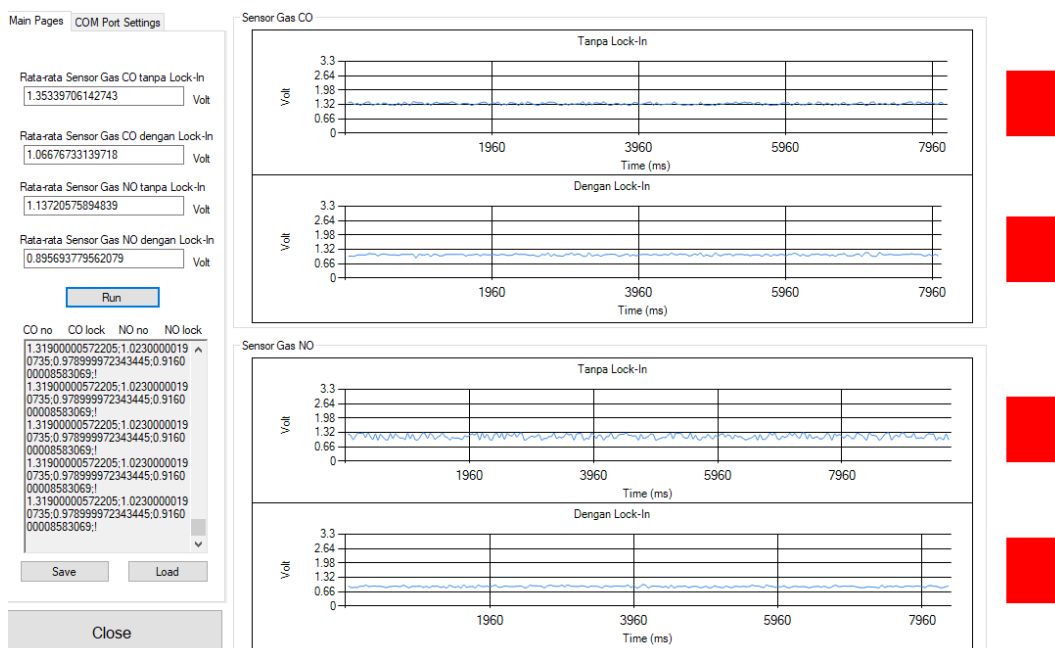
Gambar – gambar di bawah ini merupakan tampilan GUI ketika udara bersih melewati tabung sampel pada sistem sensor NDIR.



Gambar 4.13 Rekam Awal Ketika Dilewati Udara Bersih



Gambar 4.14 Rekam Kedua Ketika Dilewati Udara Bersih



Gambar 4.15 Rekam Ketiga Ketika Dilewati Udara Bersih

Hasil yang ditampilkan oleh GUI kemudian diringkas dalam bentuk tabel seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.4 Ringkasan Data Rekam Tampilan GUI Ketika Dilewati Udara Bersih

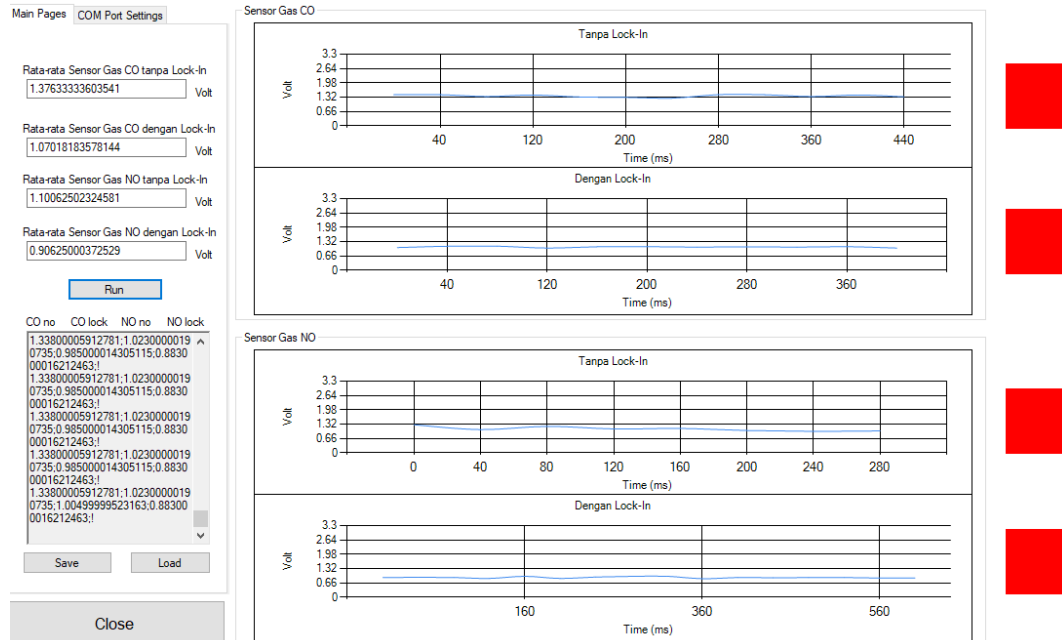
Rekam Data Ke-	Vout Detektor Gas CO (V)		Vout Detektor Gas NO (V)	
	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)
1	1,354	1,063	1,143	0,896
2	1,352	1,064	1,140	0,900
3	1,353	1,066	1,137	0,895
Rata - Rata	1,353	1,064	1,140	0,897

Nilai rata-rata yang ditampilkan oleh Tabel 4.4 dijadikan sebagai nilai referensi / batasan untuk pendeteksian gas CO dan NO ketika menggunakan tampilan GUI. Ketika sistem sensor NDIR digunakan untuk mendeteksi gas CO dan NO, nilai luaran dari detektor termopile akan berada di bawah nilai referensi.

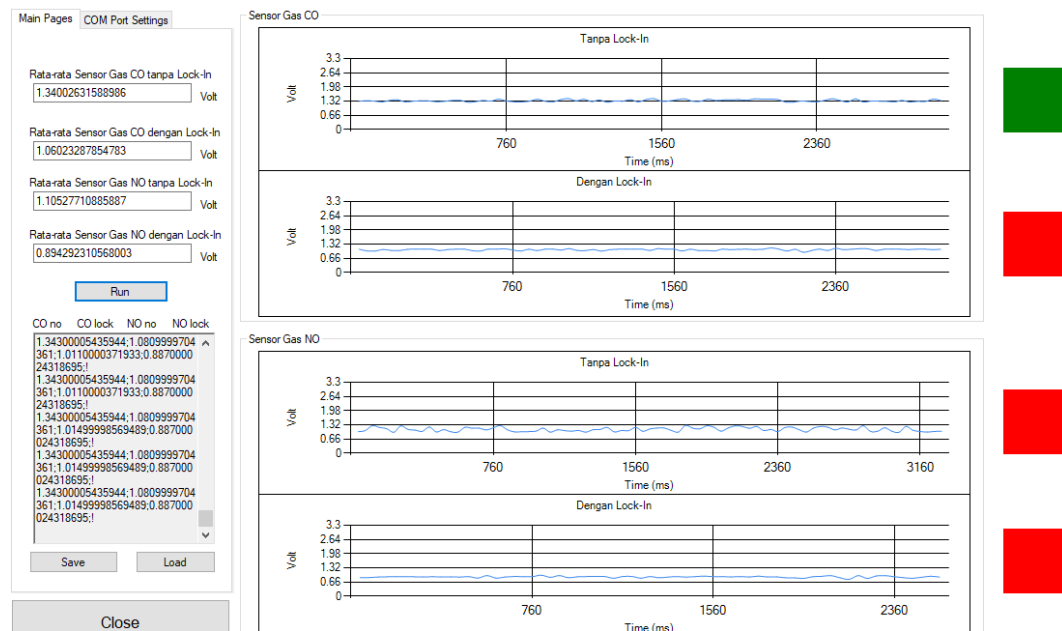
Selanjutnya adalah menerapkan sistem sensor NDIR untuk mendeteksi keberadaan gas CO dan NO. Pendeteksian senyawa gas-gas tersebut dilakukan dengan menggunakan sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermotor bermesin bensin. Pada rekam data awal, terlihat bahwa indikator yang berada di sistem sensor NDIR menunjukkan warna dasar merah. Hal ini disebabkan karena untuk pengujian awal setelah dilewati oleh udara bersih, nilai luaran detektor masih tinggi. Ketika sensor dilewati sampel gas dari asap kendaraan bermotor, harapannya adalah warna indikator berubah menjadi hijau karena nilai luaran termopile hasil pendeteksian lebih kecil daripada nilai batasannya.

Pada rekam data kedua, indikator tanpa *lock-in* untuk sensor gas CO mulai berubah menjadi hijau. Namun, belum terjadi pada indikator dengan *lock-in*. Indikator dengan *lock-in* mulai berubah menjadi warna hijau pada rekam data ketiga, namun indikator tanpa *lock-in* berubah kembali menjadi merah. Selanjutnya, pada rekam data terakhir, kedua warna indikator berubah menjadi hijau. Rekam data gambar ini diambil pada waktu yang berbeda-beda dan ketika perubahan warna indikator terjadi pada waktu yang cukup lama.

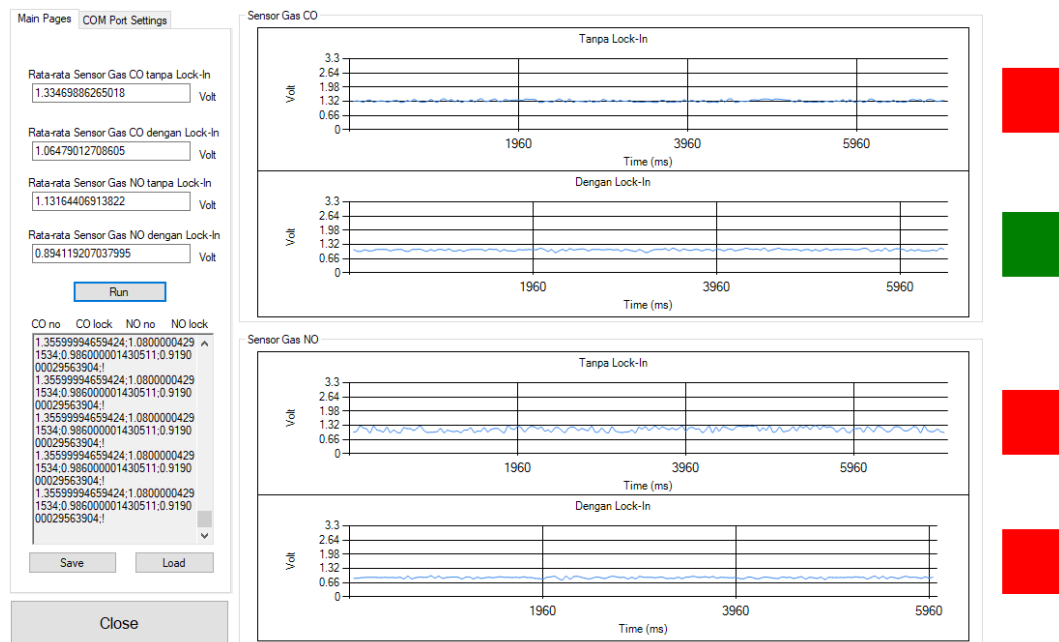
Hasil rekam data pendeteksian gas CO dan NO menggunakan sampel gas tersebut dan ditampilkan oleh gambar berikut ini:



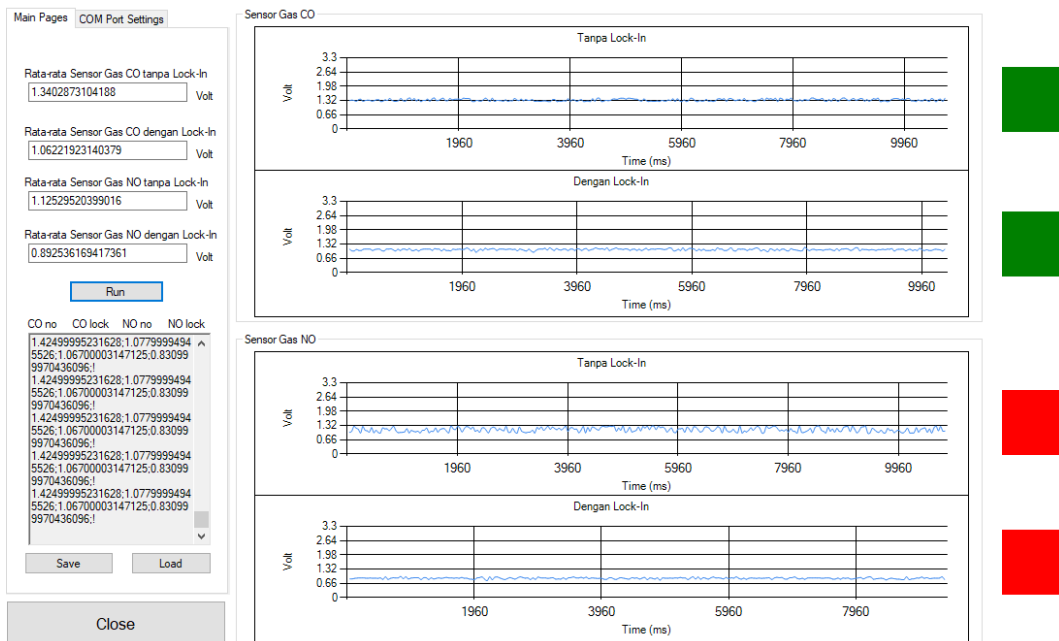
Gambar 4.16 Rekam Pertama Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Asap Mesin Bensin



Gambar 4.17 Tampilan GUI pada Rekam Kedua



Gambar 4.18 Tampilan GUI pada Rekam Ketiga



Gambar 4.19 Tampilan GUI pada Rekam Keempat

Tabel 4.5 Ringkasan Data Rekam Tampilan GUI Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Mesin Bensin

Rekam Data Ke-	Vout Detektor Gas CO (V)		Vout Detektor Gas NO (V)	
	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)
1	1,376	1,070	1,100	0,906
2	1,340	1,060	1,105	0,894
3	1,334	1,064	1,131	0,894
4	1,340	1,062	1,125	0,892
Rata - Rata	1,347	1,064	1,115	0,896

Setelah mendapatkan informasi data yang ditulis pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5, selanjutnya adalah membandingkan hasil kedua data tersebut. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa respon luaran rata-rata detektor gas CO dengan penguat *lock-in* ketika dilewati sampel gas dari asap mesin bensin adalah bernilai sama dengan pada saat dilewati oleh udara bersih. Selain data tersebut, nilai respon luaran detektor untuk pendeteksian gas CO maupun NO adalah di bawah nilai luaran rata-rata ketika dilewati oleh udara bersih.

Tabel 4.6 Ringkasan Indikator Pendeteksian gas CO dan NO Menggunakan Sampel Gas Dari Mesin Bensin

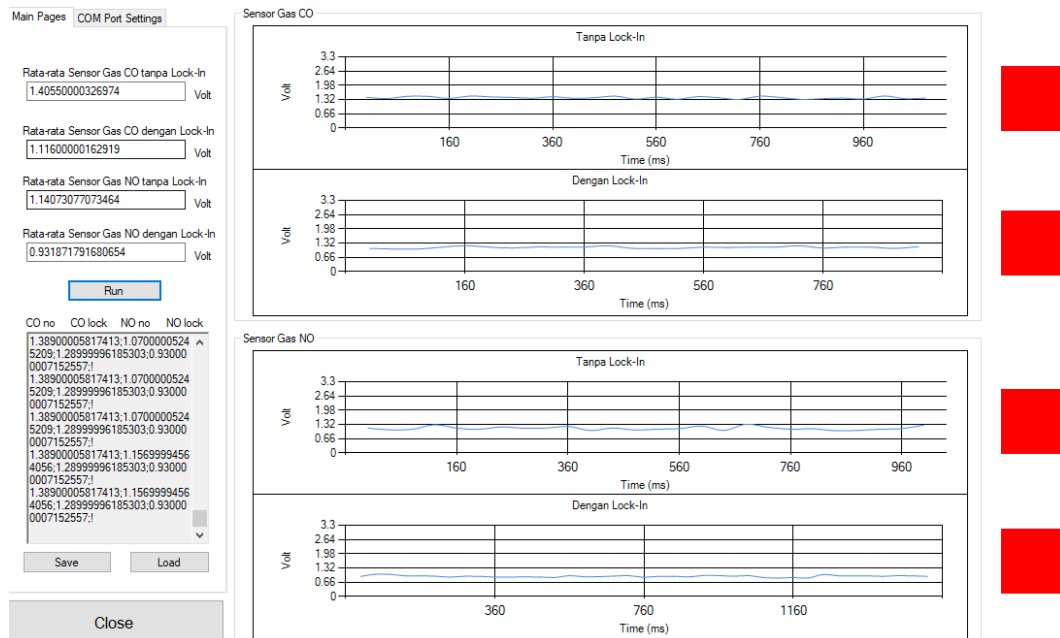
Rekam Data Ke-	Indikator Pendeteksian			
	Gas CO		Gas NO	
	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i>	Dengan Penguat <i>Lock-in</i>	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i>	Dengan Penguat <i>Lock-in</i>
1	T	T	T	T
2	Y	T	T	T
3	T	Y	T	T
4	Y	Y	T	T

Merujuk pada data di Tabel 4.6, pada percobaan 2, 3 dan 4 indikator pada sistem sensor NDIR menunjukkan bahwa gas CO terdeteksi, baik tanpa maupun menggunakan penguat *lock-in*. Informasi yang ditunjukkan oleh indikator harus memperhatikan data kuantitatifnya. Indikator tersebut akan menampilkan informasi berdasarkan nilai batasan yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai batasan tersebut didapatkan dari respon luaran detektor termopile ketika dialiri udara bersih.

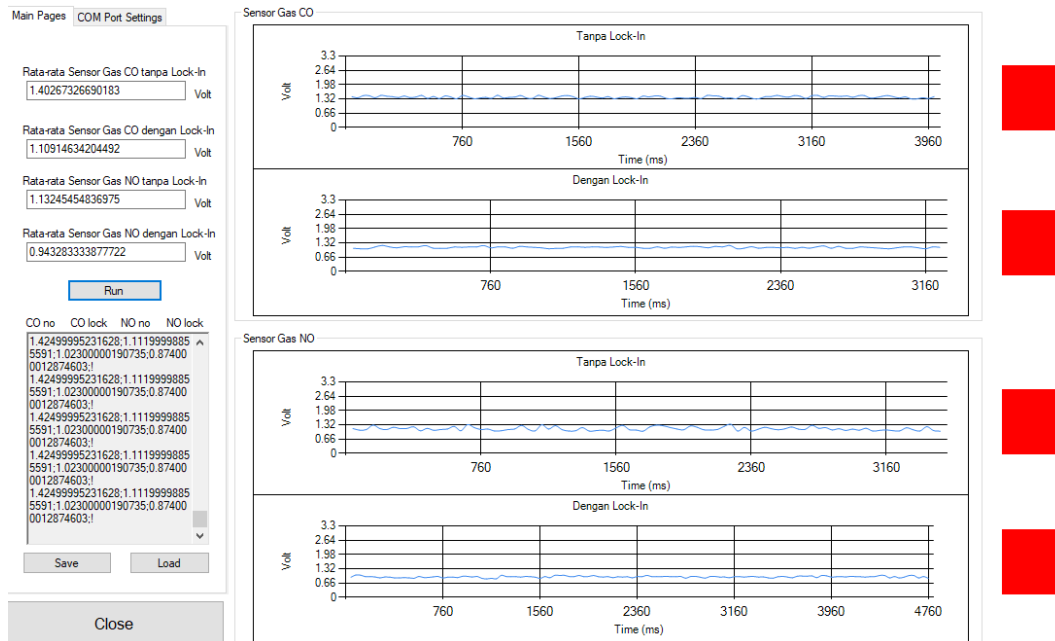
4.5.2 Pendeteksian Menggunakan Sampel Gas Asap Mesin Diesel

Setelah sistem sensor NDIR diterapkan untuk pendeteksian gas CO dan NO dengan menggunakan sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermesin bensin, kemudian sampel gas diganti dengan asap kendaraan bermesin diesel. Langkah pengujian pendeteksian pada subbab ini mengikuti tahapan yang dilakukan seperti pada subbab pengujian sebelumnya.

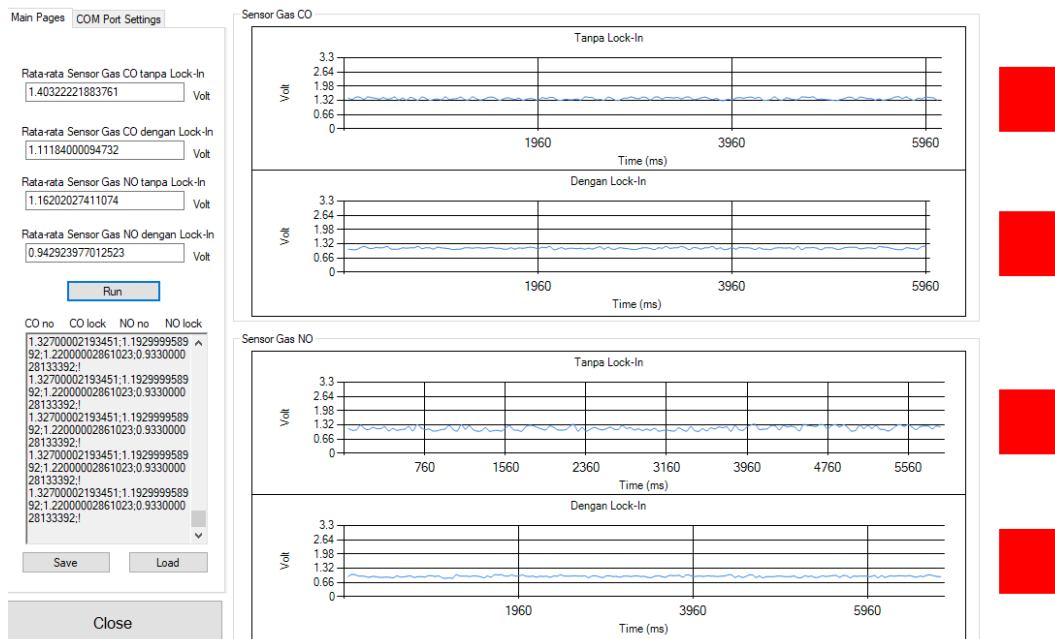
Pengujian awal dengan melewati udara bersih ke dalam tabung sampel, hasilnya dapat dilihat pada gambar berikut:



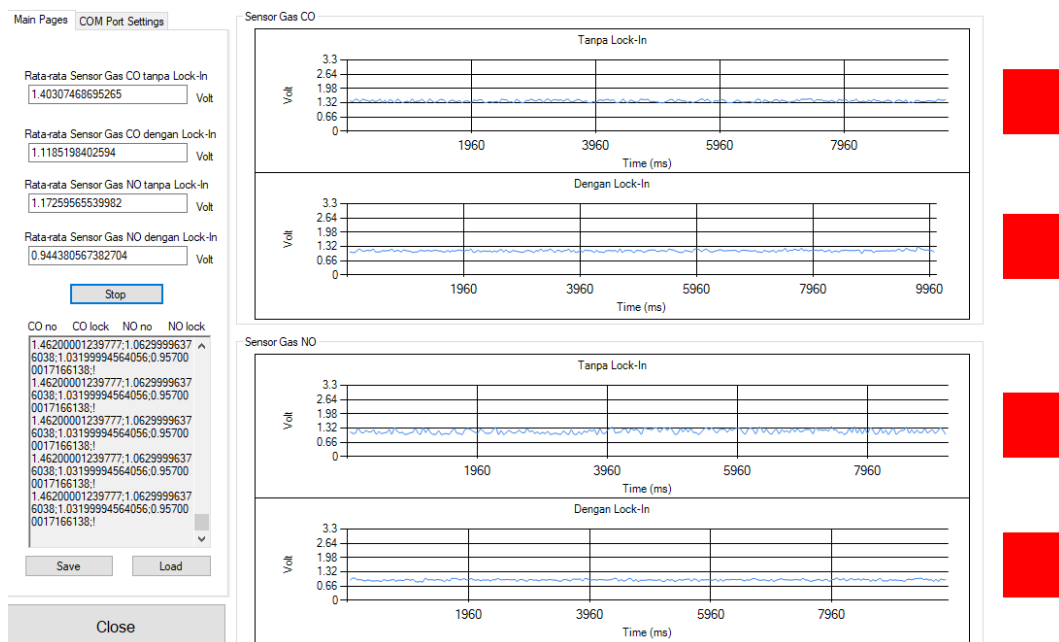
Gambar 4.20 Rekam Awal Ketika Dilewati Udara Bersih



Gambar 4.21 Rekam Kedua Ketika Dilewati Udara Bersih



Gambar 4.22 Rekam Ketiga Ketika Dilewati Udara Bersih

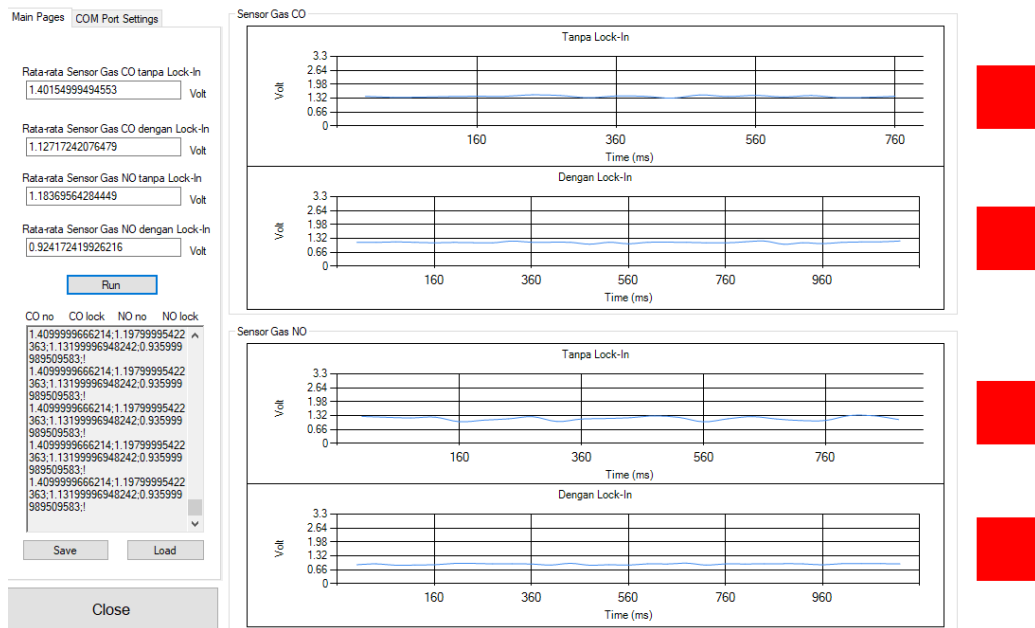


Gambar 4.23 Rekam Keempat Ketika Dilewati Udara Bersih

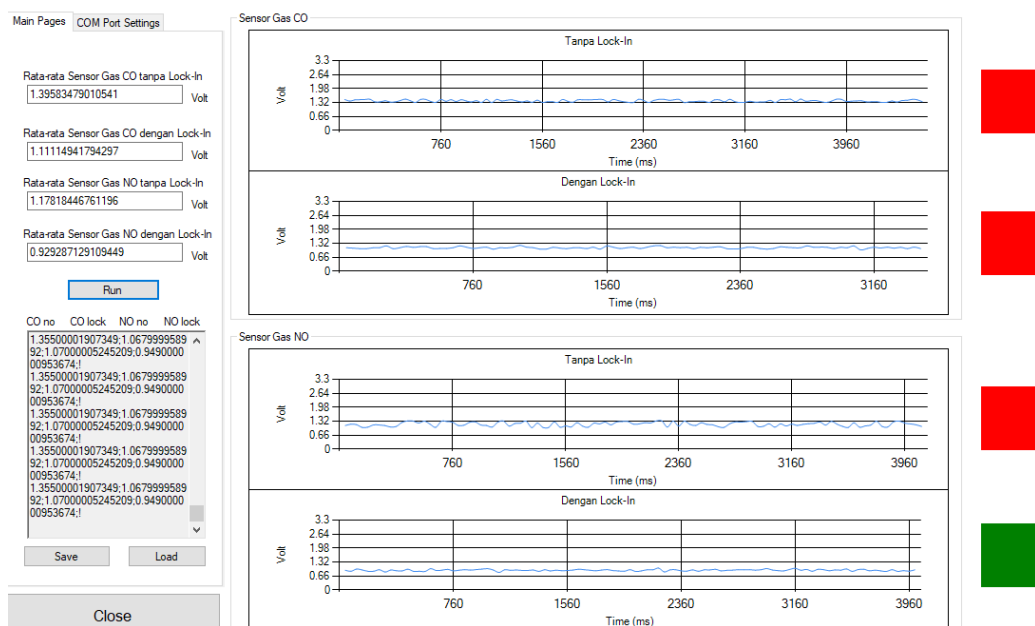
Tabel 4.7 Ringkasan Data Rekam Tampilan GUI Ketika Dilewati Oleh Udara Bersih

Rekam Data Ke-	Vout Detektor Gas CO (V)		Vout Detektor Gas NO (V)	
	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)
1	1,405	1,116	1,140	0,931
2	1,402	1,109	1,132	0,943
3	1,403	1,118	1,162	0,942
4	1,403	1,118	1,172	0,944
Rata - Rata	1,403	1,115	1,151	0,940

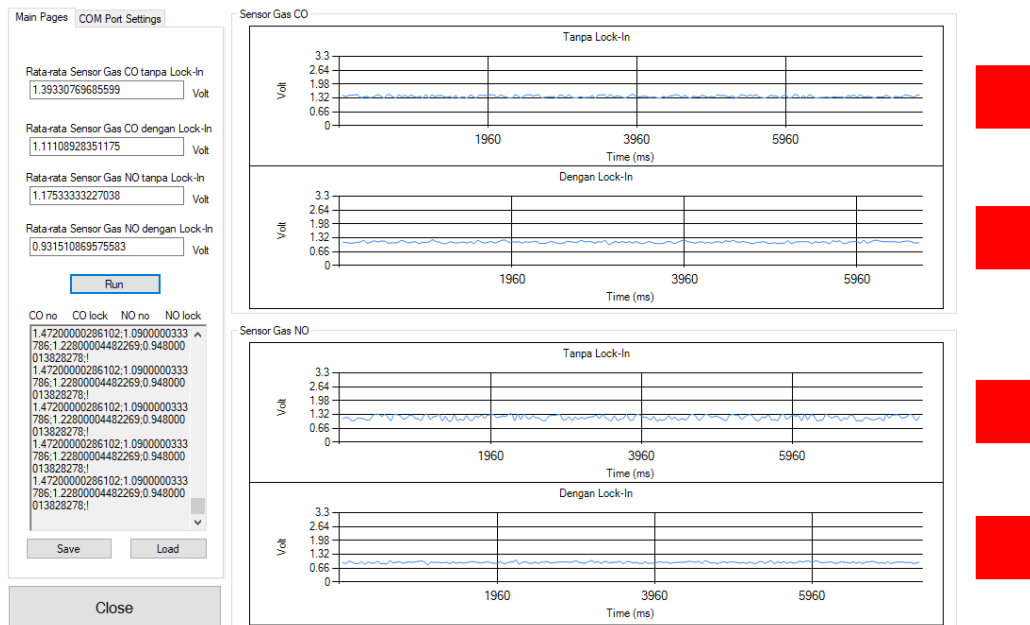
Setelah sistem sensor dilewati oleh udara bersih, selanjutnya adalah melakukan pengujian sistem sensor NDIR dengan menggunakan sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermesin diesel. Hasil rekam data laman utama GUI ditampilkan oleh gambar-gambar berikut ini:



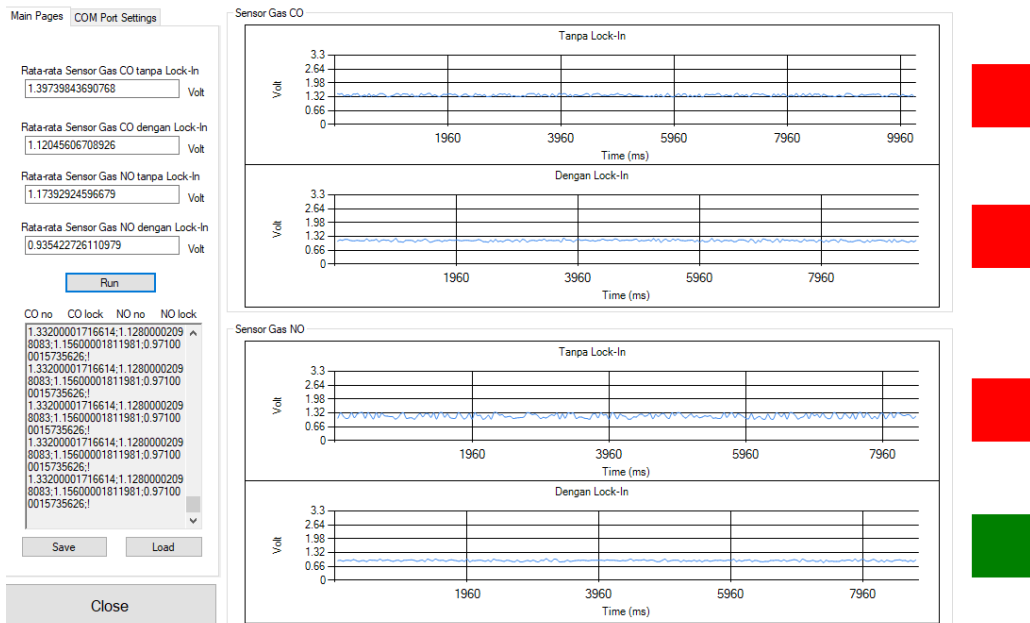
Gambar 4.24 Rekam Pertama Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Asap Mesin Diesel



Gambar 4.25 Tampilan GUI pada Rekam Kedua



Gambar 4.26 Tampilan GUI pada Rekam Ketiga



Gambar 4.27 Tampilan GUI pada Rekam Keempat

Tabel 4.8 Ringkasan Data Rekam Tampilan Laman Utama GUI Ketika Dilewati Oleh Sampel Gas dari Mesin Diesel

Rekam Data Ke-	Vout Detektor Gas CO (V)		Vout Detektor Gas NO (V)	
	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i> (V)	Dengan Penguat <i>Lock-in</i> (V)
1	1,401	1,127	1,183	0,924
2	1,395	1,111	1,178	0,929
3	1,393	1,111	1,175	0,931
4	1,397	1,120	1,173	0,935
Rata - Rata	1,396	1,117	1,177	0,929

Berdasarkan informasi data pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8, selanjutnya adalah membandingkan nilai rata-rata luaran detektor termopile untuk Gas CO dan NO. Hasilnya adalah ketika tabung sampel dilewati oleh gas dari asap mesin diesel, respon luaran detektor gas CO dengan penguat *lock-in* berada di atas respon luaran ketika dilewati oleh udara bersih. Hal tersebut juga berlaku pada respon luaran detektor gas NO tanpa penguat *lock-in*. Selain kasus yang telah disebutkan, nilai respon luaran detektor gas CO maupun NO berada di bawah nilai respon ketika dilewati oleh udara bersih.

Tabel 4.9 Ringkasan Indikator Pendeteksian gas CO dan NO Menggunakan Sampel Gas Dari Mesin Diesel

Rekam Data Ke-	Indikator Pendeteksian			
	Gas CO		Gas NO	
	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i>	Dengan Penguat <i>Lock-in</i>	Tanpa Penguat <i>Lock-in</i>	Dengan Penguat <i>Lock-in</i>
1	T	T	T	T
2	T	T	T	Y
3	T	T	T	T
4	T	T	T	Y

Data ringkasan indikator pendeteksian gas CO maupun NO terdapat pada Tabel 4.9. Data tersebut menunjukkan respon indikator pada sistem sensor NDIR ketika dilewati oleh sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermesin diesel. Meskipun pada percobaan ke-2 dan ke-4 detektor gas NO dengan penguat *lock-in* menunjukkan gas NO terdeteksi, namun hal tersebut harus dikonfirmasi ulang dengan data yang terdapat pada Tabel 4.8.

Konfirmasi ulang dengan membandingkan nilai luaran detektor termopilenya dan kemudian melihat hubungan dengan respon indikator tersebut. Hasil tampilan indikator yang tidak sesuai dapat terjadi karena proses pengiriman data dari mikrokontroler ke komputer membutuhkan waktu untuk proses pembacaannya. Jika proses pengiriman data terhambat atau terganggu, maka data yang ditampilkan bisa tidak sesuai dengan informasi aslinya.

Selain itu, penggunaan GUI memiliki harapan untuk membantu memvisualisasikan respon detektor termopile ketika sistem sensor digunakan untuk mendeteksi senyawa gas CO maupun NO. Harapan awalnya adalah ketika dialiri oleh udara bersih, respon detektor termopile adalah menunjukkan respon grafik yang stabil. Namun ketika diberikan sampel gas yang berasal dari luar, maka respon grafik yang stabil tersebut akan berubah / bergerak turun dari nilai acuan yang telah dibuat sebelumnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem sensor NDIR untuk mendeteksi keberadaan senyawa gas CO dan NO telah dibuat. Pengujian yang dilakukan berupa pengujian langsung luaran detektor termopile ketika tabung sampel dialiri udara bersih dan memasukkan sampel gas yang berasal dari asap kendaraan bermotor bermesin bensin dan diesel. Selain pengujian langsung, diterapkan pula penguat *lock-in* digital pada sistem sensor tersebut. Pengujian langsung dilakukan dengan menyuntikkan sampel gas ke tabung sampel. Luarannya berupa respon detektor termopile A1 dan A2 turun untuk rentang volume gas tertentu. Respon detektor termopile A1 untuk gas NO adalah menurun pada rentang volume sampel gas 60 – 100ml sedangkan respon detektor termopile A2 untuk gas CO adalah menurun pada rentang volume gas 40 – 100ml. Dengan menggunakan kuantitas volume sampel gas yang besar, respon luaran detektor termopile untuk gas CO dan NO menunjukkan kecenderungan menurun untuk masing-masing hasil pengujian. Akan tetapi, pada langkah pengujian tertentu, tren tersebut berbalik naik meskipun tidak signifikan. Penguat *lock-in* diterapkan dengan menggunakan frekuensi referensi 1kHz. Penggunaan indikator deteksi pada GUI memberikan informasi yang harus ditinjau ulang mengikuti data informasi yang telah didapatkan sebelumnya dan memperhatikan pergerakan grafik respon detektor termopile.

Saran pada penelitian pendeteksian gas CO dan NO untuk konsentrasi rendah yakni harus memperhatikan keadaan lingkungan sekitar dan memperhatikan rangkaian yang digunakan. Penggunaan indikator deteksi harus dibarengi dengan referensi data luaran detektor termopile. Selain itu, penggunaan indikator tersebut harus memperhatikan respon grafik yang ditampilkan. Respon grafik yang ditampilkan berkaitan dengan kemampuan sistem sensor yang telah dirancang.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. H. Crawley, "Application of Non-Dispersive Infrared (NDIR) Spectroscopy to the Measurement of Atmospheric Trace Gases," University of Canterbury, Christchurch New Zealand, 2008.
- [2] H. Liu, T. Chen, D. Chen, D. Chang dan R. L. Frost, "The development of a new method for the determination of concentrations of carbonaceous gases using a non-dispersive infrared sensor," Elsevier Ltd, 2013.
- [3] T. A. Vincent, B. Urasinska-Wojcik dan J. W. Gardner, "Development of a low-cost NDIR system for ppm detection of carbon dioxide in exhaled breath analysis," Elsevier Ltd, Warwick, 2015.
- [4] A. A. K. S. T. D. Widhiani, K. D. C. and I. N. K. W. , "Pengembangan Metode Kromatografi Gas Detektor Ionisasi Nyala Untuk Analisis Co Dan Co2 Di Udara," *Jurnal Farmasi Udayana*, 2013.
- [5] M. R. and T. , "Fuel Qualification Using Quartz Sensors," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 16, pp. 6737-6743, 2015.
- [6] J.-C. Kim, T.-V. Dinh, C. In-Young dan K.-Y. Song, "Physical and chemical factors influencing the continuous monitoring of carbon monoxide using NDIR sensor," IEEE, Seoul, 2015.
- [7] M. Dong, C. Zheng , S. Miao, F. Song dan Y. Wang, "A mid-infrared carbon monoxide sensor system using wideband absorption spectroscopy and a single-reflection spherical opticalchamber," *Infrared Physics & Technology*, vol. 85, p. 450–456, 2017.
- [8] C. L. Townsend dan R. L. Maynard, "Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide," Department of Health, London, the UK, 2002.
- [9] M. K. Al-Ali dan P. H. Howarth, "Nitric oxide and the respiratory system in health and disease," *Respiratory Medicine*, vol. 92, pp. 701-715, 1998.
- [10] J. Y. Wong dan M. Schell, "Zero drift NDIR gas sensors," *Sensor Review*, vol. 31/1, pp. 70-77, 2011.
- [11] T.-V. Dinh, I.-Y. Choi, Y.-S. Son dan J.-C. Kim, "A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction," Elsevier B.V., Seoul, 2016.

- [12] G. d. Graaf, F. Bakker dan R. F. Wolffenbuttel, "Sensor platform for gas composition measurement," *Procedia Engineering*, vol. 25, p. 1157 – 1160, 2011.
- [13] C. Hummelgård, I. Bryntse, M. Bryzgalov , J.-Å. Henning , H. Martin, M. Norén dan H. Rödjegård, "Low-cost NDIR based sensor platform for sub-ppm gas detection," *Urban Climate*, vol. 14, pp. 342-350, 2015.
- [14] Fajar Budiman, Muhammad Rivai dan Faraha Pambayun, "Non-Dispersive Infrared (NDIR) Sensor Design and Its Application on Alcohol Detection," IEEE, Surabaya, 2016.
- [15] Justel, Prof. Dr. T., "Fachbereich Chemieingenieurwesen - FH Muenster Incandescent and halogen Lamps," 2016. [Online]. [Accessed 5 12 2018].
- [16] J. Fraden, Hanbook of Modern Sensors: Physics, Design and Applications 4th Edition, New York: Springer, 2010.
- [17] H. Fritzsche, "Wien's Law," 2006. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/Wienslaw>. [Diakses 18 11 2017].
- [18] J. S. Wilson, Sensor Technology Handbook, Burlington, Massachusetts: Elsevier, 2005.
- [19] InfraTec, "IR Filters and Windows," InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden, Germany, 2017.
- [20] A. Gutierrez-Arroyo, E. Baudet, L. Bodiou, V. Nazabal, E. Rinnert, K. Michel, B. Bureau, F. Colas dan J. Charrier, "Theoretical study of an evanescent optical integrated sensor for multipurpose detection of gases and liquids in the Mid-Infrared," Elsevier B.V, Lannion Cedex, 2017.
- [21] NIST, "Carbon Monoxide," 2009. [Online]. Available: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C630080&Type=IR-SPEC&Index=1>. [Diakses 26 11 2017].
- [22] NIST, "Nitrite Oxide," 2009. [Online]. Available: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C10102439&Units=SI&Mask=480>. [Diakses 26 11 2011].
- [23] D. S. Aji Pambudi, M. R. and A. Arifin, "Detection of Organic Solvent Compounds Using Optical Fiber Interferometer Array and Neural Network Pattern Recognition," *International Conference on Information and Communications Technology*, pp. 477-482, 2018.
- [24] P. Lubis, "Heterostruktur Fabry-Perot Sebagai Bahan Pembelajaran Optik," *Jurnal Ilmu Kependidikan*, vol. 13, pp. 1-135, 1 Januari 2015.
- [25] E. Hecht, Optics, 4 ed., San Francisco, California: Addison Wesley, 2002.

- [26] N. P. Ayerden, M. Ghaderi, P. Enoksson, G. d. Graaf dan R. F. Wolffenbuttel, "A miniaturized optical gas-composition sensor with integrated sample chamber," *Sensors and Actuators B*, vol. 236, p. 917–925, 2016.
- [27] Handi Rahmanhuri, Muhammad Rivai dan Tri Arief Sardjono, "Design of Digital Lock-In Amplifier for Low Concentration Gas Detection," IEEE, Surabaya, 2017.
- [28] L. Scholz, S. Knobelspies, A. O. Perez, J. Wöllenstein dan S. Palzer, "MID-IR LED-based, photoacoustic CO₂ sensor," *Procedia engineering*, vol. 120, pp. 1233-1236, 2015.
- [29] G. B. Armen, "Phase sensitive detection: the lock-in amplifier," The University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, 2008.
- [30] T. Mujiono, Y. Sukekawa, T. Nakamoto, H. Mitsuno, M. Termtanasombat, R. Kanzaki and N. Misawa, "Sensitivity Improvement by Applying Lock-In Technique to Fluorescent Instrumentation for Cell-Based Odor Sensor," *Sensors and Materials*, vol. 29, no. 1, pp. 65-76, 2017.
- [31] "UDT Sensors Inc.," [Online]. Available: <http://qtworke.tudelft.nl/~schouten/linkload/phdiode.pdf>. [Accessed 12 Desember 2018].
- [32] D. Rofiqoh, Muhammad Rivai and F. Budiman, "Implementasi Penguat Lock-in Digital Untuk Deteksi Gas," Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [33] IEEE, "IEEE Citation Reference," [Online]. Available: www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf.
- [34] Feedback Instruments Ltd., Digital Pendulum: Control in a Matlab Environment, Sussex, UK: Feedback Instruments Ltd., 2006.
- [35] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 45, pp. 135-156, 1992.
- [36] J. Mayrwöger, W. Reichl, P. Hauer, C. Krutzler and B. Jakoby, "Design and Simulation of a NDIR Gas Sensor System with Ray Tracing Using a Monte-Carlo Method," in *Sensor+Test IRS2 Proceeding*, Linz Austria, 2009.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran Program Arduino yang digunakan selama proses pengujian sensor NDIR

```
#define FULL_SCALE 4095
#define VREF 3.3

/////////////////////////////////////////////////////////////////
const int numReadings = 50; //bisa diganti
const int pinSensor = A1;
const int pinSensor2 = A2;
const int pinRTD = A3; //utk thermopile A1
const int pinRTD2 = A4; //utk thermopile A2
const int pinSigCarrier = A5;
const int Tkedip = 1000; //lama waktu yang digunakan lampu(micros)

int pinSignalKotak = 5; //Pin Out Sinyal Kotak
int pindigSignalKotak = A8;
int digSignalKotak;
int pinLampu = 12;
int pinDLIA_A1 = 2, pinDLIA_A2 = 3;

/////////////////////////////////////////////////////////////////

int readingsA1[numReadings], readingsA2[numReadings];
char buff;
char temp[33];

int readingsDLIA_A1[numReadings], readingsDLIA_A2[numReadings];
int readIndex = 0, readIndex_DLIA = 0;
int totalA1 = 0, totalA2 = 0;
int totDLIA_A1 = 0, totDLIA_A2 = 0;
int averageA1 = 0, averageA2 = 0;
int averageDLIA_A1 = 0, averageDLIA_A2 = 0;

//data sens utk kirim tampilan
double dataSensK = 0, dataSensK2 = 0;
int dataSens = 0, dataSens2 = 0;
int dataRTD = 0, dataRTD2 = 0;

int varia = 0;
int wktawal, var = 0;
//data sigcar utk kirim tampilan
double SigCarrierK = 0;
int SigCarrier = 0;
int SigFM = 0, sigFmOldh = 0, sigFmOldh1 = 0;
int SigFML = 0, sigFmOld = 0, sigFmOld1 = 0;
int SigFM2 = 0, sigFmOldh2 = 0, sigFmOldh3 = 0;
int SigFML2 = 0, sigFmOld2 = 0, sigFmOld3 = 0;

double Lp0aK, Lp1aK;
```

```

int Lp0a, Lp0 = 0, lpoOld = 0, lpoOld1 = 0, lpoOld2 = 0, lpoOld3 = 0;
int Lp0_A = 0, Lp0_B = 0, Lp0_C = 0, Lp0_D = 0, Lp0_E = 0, Lp0_F = 0;
int Lp1a, Lp1 = 0, lp1Old = 0, lp1Old1 = 0, lp1Old2 = 0, lp1Old3 = 0;
int Lp1_A = 0, Lp1_B = 0, Lp1_C = 0, Lp1_D = 0, Lp1_E = 0, Lp1_F = 0;

int Hp0a, Hp0 = 0, hpoOld = 0, hpoOld1 = 0, hpoOld2 = 0, hpoOld3 = 0;
int Hp0_A = 0, Hp0_B = 0, Hp0_C = 0, Hp0_D = 0, Hp0_E = 0, Hp0_F = 0;
int Hp1a, Hp1 = 0, hp1Old = 0, hp1Old1 = 0, hp1Old2 = 0, hp1Old3 = 0;
int Hp1_A = 0, Hp1_B = 0, Hp1_C = 0, Hp1_D = 0, Hp1_E = 0, Hp1_F = 0;
int ax1, ax1Old, bx1,cx1,dx1; //termopile A1
int ax2, ax2Old, bx2,cx2,dx2; //termopile A2

// milik thermopile 1
double x0K; //data sens A1 comp utk kirim
int x0 = 0, x1 = 0;
int yo = 0, yi = 0;
// milik thermopile 2
double k0K; //data sens A2 comp utk kirim
int k0 = 0, k1 = 0;
int lo = 0, li = 0;

float alpha = 0.8;
////////////////////////////////////

const unsigned long period = 1000; // frekuensi sinyal kotak 1kHz
unsigned int currentTime = 0, time1 = 0, time2 = 0, time3 = 0,
startTime = 0;

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    //Serial.begin(9600);
    Serial.begin(115200);
    //while(!Serial.available());

    analogWriteResolution(12); // set the analog output resolution
    to the desired amount of bits
    analogReadResolution(12); // set the analog input resolution
    to desired amount of bits

    pinMode(pinSignalKotak, OUTPUT);
    pinMode(pindigSignalKotak, INPUT);
    pinMode(pinSigCarrier, INPUT);
    pinMode(pinSensor, INPUT);
    pinMode(pinSensor2, INPUT);
    pinMode(pinRTD, INPUT);
    pinMode(pinRTD2, INPUT);
    pinMode(pinLampu, OUTPUT);
    pinMode(pinDLIA_A1, OUTPUT);
    pinMode(pinDLIA_A2, OUTPUT);
    //wktawal = micros();

```

```

    currentTime = micros();
    startTime = millis(); //initial start time
    varia=1;

    for (int thisReading = 0; thisReading < numReadings;
thisReading++) {
        readingsA1[thisReading] = 0, readingsDLIA_A1[thisReading] = 0,
        readingsDLIA_A2[thisReading] = 0, readingsA2[thisReading] =
0;}
    }

    void loop() {
        currentTime = micros();

        ////////////////////////////////////LAMPU SUMBER IR////////////////////////////////////
        //digitalWrite(pinLampu, HIGH);

        if (((micros()-wktawal) % Tkedip) <= (Tkedip/2)){
            digitalWrite(pinLampu, HIGH);
        }
        else if (((micros()-wktawal)%Tkedip)>=(Tkedip/2)){
            digitalWrite(pinLampu, LOW);
        }

        if(currentTime - time2 >= 1000){
            time2 = currentTime;

            dataSens = analogRead(pinSensor);           //datasens untuk
proses
            dataSens2 = analogRead(pinSensor2);         //datasens untuk
proses 2

            dataSensK = (analogRead(pinSensor)*VREF)/FULL_SCALE;
            dataSensK2 = (analogRead(pinSensor2)*VREF)/FULL_SCALE;

            dataRTD = analogRead(pinRTD);
            dataRTD2 = analogRead(pinRTD2);

            x0 = dataSens*0.94; k0 = dataSens2*0.94; //data utk diproses
            x0K = dataSensK*0.94; k0K = dataSensK2*0.94; //dalam Volt

            //x0 adalah sensor NO
            //k0 adalah sensor CO

            //      sprintf(temp,"a%1.3f",k0K);
            //      Serial.println(temp);
            //
            //      sprintf(temp,"c%1.3f",x0K);
            //      Serial.println(temp);
            //

            Serial.print(x0);Serial.print("\t");
            Serial.print(k0);Serial.print("\t");
            //Serial.print(dataRTD); Serial.print("\t");
            Serial.print(dataRTD2); Serial.print("\t");

            ////////////////////////////////////SMOOTHING LANGSUNG TERMOPILE ////////////////////////////////////

```

```

totalA1 = totalA1 - readingsA1[readIndex];
totalA2 = totalA2 - readingsA2[readIndex];
readingsA1[readIndex] = x0; //sensorTpile A1 comp
readingsA2[readIndex] = k0; //sensorTpile A2 comp
totalA1 = totalA1 + readingsA1[readIndex];
totalA2 = totalA2 + readingsA2[readIndex];

readIndex = readIndex + 1;

if (readIndex >= numReadings) {
    readIndex = 0;}

averageA1 = totalA1 / numReadings; //nilai MOVAverage Tpile A1
averageA2 = totalA2 / numReadings; //nilai MOVAverage Tpile A2

//Serial.print(averageA1);Serial.print("\t");
Serial.print(averageA2);Serial.print("\t");
//////////SMOOTHING LANGSUNG TERMOPILE//////////

//////////PROSES DLIA//////////
//sinyal kotak dari osilator dengan pembagi tegangan

digSignalKotak = analogRead(pindigSignalKotak);
//digSignalKotak = map(digSignalKotak, 0, 1023, 0, 255); // re-
skala sinyal kotak
SigCarrier = digSignalKotak; // sinyal kotak utk proses
SigCarrierK = (digSignalKotak*VREF)/FULL_SCALE; //sinyal kotak utk
modulasi dan ref dalam Volt

// SigFM dan SigFM2 adalah nilai Y yang kemudian difilter
// jangan diubah

sigFmOldh1 = sigFmOldh;
sigFmOldh3 = sigFmOldh2;

sigFmOldh = SigFM;
sigFmOldh2 = SigFM2;

//konstanta utk adjusting ADC number
SigFM = 0.05*(SigCarrier*x0); SigFM2 = 0.05*(SigCarrier*k0);
//sig termodulasi utk proses
//SigFM = (SigCarrier*x0); SigFMP2 = (SigCarrierP*k0P);

// jangan diubah
//////////
//////////
//HPF fc 50Hz, fmax 1000Hz, fsampling 5000Hz
//wn = fc/(fs/2)
//// koefisien b
Hp0_A = 0.9695*SigFM; Hp1_A = 0.9695*SigFM2;
Hp0_B = -0.9695*(sigFmOldh); Hp1_B = -
0.9695*(sigFmOldh2);
//// koefisien a
Hp0_C = 0.9391*(hpoOld); Hp1_C = 0.9391*(hp1Old);
//Hp0_D = 0.9391*(hpoOld2); Hp1_D = 0.9391*(hp1Old2);

```

```

Hp0 = Hp0_A + Hp0_B + Hp0_C + Hp0_D;    //HPF Termopile A1
Hp1 = Hp1_A + Hp1_B + Hp1_C + Hp1_D;    //HPF Termopile A2

hpoOld2 = hpoOld; hp1Old2 = hp1Old;
hpoOld = Hp0;      hp1Old = Hp1;

Hp0a = Hp0;      Hp1a = Hp1;

//Serial.print(Hp0a);Serial.print("\t"); Serial.print(Hp1a);
Serial.print("\t");
//Serial.print(digSignalKotak);Serial.print("\t");
//Serial.print(SigCarrier);Serial.print("\t");
Serial.print(SigFM); Serial.print("\t"); Serial.print(SigFM2);
Serial.print("\t");

////////////////////////////////////
//////////
// jangan diubah agar susunannya n-1

sigFmOld1 = sigFmOld;
sigFmOld3 = sigFmOld2;

sigFmOld = SigFML;
sigFmOld2 = SigFML2;

SigFML = Hp0a;
SigFML2 = Hp1a;

// jangan diubah

//LPF fc 5Hz, fmax 1000Hz, fsampling 5000Hz
//wn = fc(/fs/2)

Lp0_A = 0.0031*SigFML;          Lp1_A = 0.0031*SigFML2;
Lp0_B = 0.0031*(sigFmOld);      Lp1_B = 0.0031*(sigFmOld2);
//Lp0_C = 0.0055*(sigFmOld1);    //Lp1_C = 0.0055*(sigFmOld3);

Lp0_D = 0.9937*(lpoOld);        Lp1_D = 0.9937*(lp1Old);
//Lp0_E = 0.9969*(lpoOld2);      Lp1_E = 0.9969*(lp1Old2);
//Lp0_F = 0.0016*(lpoOld3);      Lp1_F = 0.7558*(lp1Old3);

Lp0 = Lp0_A + Lp0_B + Lp0_C + Lp0_D;    //LPF Termopile A1
Lp1 = Lp1_A + Lp1_B + Lp1_C + Lp1_D;    //LPF Termopile A2

lpoOld2 = lpoOld;   lp1Old2 = lp1Old;
lpoOld = Lp0;      lp1Old = Lp1;

Lp0a = Lp0;      Lp1a = Lp1;          // hasil DLIA

ax1 = Lp0a;      ax2 = Lp1a;          //DLIA Thermopile A1 dan A2
ax1Old = ax1;     ax2Old = ax2;

bx1 = abs(ax1 - ax1Old);      bx2 = abs(ax2 - ax2Old);
cx1 = bx1*0.5;                cx2 = bx2*0.5;
dx1 = bx1 + cx1;              dx2 = bx2 + cx2;

Lp0aK = (Lp0a*VREF)/FULL_SCALE;    // hasil DLIA dlm Volt
Lp1aK = (Lp1a*VREF)/FULL_SCALE;

```

```

//sprintf(temp,"b%1.3f",Lp0aK);
//Serial.println(temp);
//
//sprintf(temp,"d%1.3f",Lp1aK);
//Serial.println(temp);

Serial.print(Lp0a);Serial.print("\t"); Serial.println(Lp1a);
//Serial.print("\t");
//Serial.print(dx1);Serial.print("\t"); Serial.print(dx2);
Serial.print("\t");

SigFML = 0;    SigFML2 = 0;
SigFM = 0;     SigFM2 = 0;

Hp0_A = 0;     Hp1_A = 0;
Hp0_B = 0;     Hp1_B = 0;
Hp0_C = 0;     Hp1_C = 0;
Hp0_D = 0;     Hp1_D = 0;
Hp0_E = 0;     Hp1_E = 0;
Hp0a = 0;      Hp1a =0;
Hp0 = 0;       Hp1 =0;

Lp0_A = 0;     Lp1_A = 0;
Lp0_B = 0;     Lp1_B = 0;
Lp0_C = 0;     Lp1_C = 0;
Lp0_D = 0;     Lp1_D = 0;
Lp0_E = 0;     Lp1_E = 0;
Lp0a = 0;      Lp1a =0;
Lp0 = 0;       Lp1 =0;

if (var == 3){
    hpoOld3 = 0;
    hp1Old3 = 0;
    lpoOld3 = 0;
    lp1Old3 = 0;
    var = 0;
}

if (var == 2){
    hpoOld2 = 0;
    hp1Old2 = 0;
    sigFmOldh1 = 0;
    sigFmOldh3 = 0;

    lpoOld2 = 0;
    lp1Old2 = 0;
    sigFmOld1 = 0;
    sigFmOld3 = 0;
    var = 0;
}
if (var == 1){
    hpoOld = 0;
    hp1Old = 0;
    sigFmOldh = 0;
    sigFmOldh2 = 0;

    lpoOld = 0;

```



```

        lp1Old = 0;
        sigFmOld = 0;
        sigFmOld2 = 0;
    }
    var++;

    ///////////////////////////////////NILAI RATA-RATA DLIA////////////////////////////////////

    totDLIA_A1 = totDLIA_A1 - readingsDLIA_A1[readIndex_DLIA];
    totDLIA_A2 = totDLIA_A2 - readingsDLIA_A2[readIndex_DLIA];
    readingsDLIA_A1[readIndex_DLIA] = ax1; //sensorTpile A1 DLIA
    readingsDLIA_A2[readIndex_DLIA] = ax2; //sensorTpile A2 DLIA
    totDLIA_A1 = totDLIA_A1 + readingsDLIA_A1[readIndex_DLIA];
    totDLIA_A2 = totDLIA_A2 + readingsDLIA_A2[readIndex_DLIA];
    readIndex_DLIA = readIndex_DLIA + 1;

    if (readIndex_DLIA >= numReadings) {
        readIndex_DLIA = 0;}

    averageDLIA_A1 = totDLIA_A1 / numReadings; //nilai MOVAverage
    Tpile A1
    averageDLIA_A2 = totDLIA_A2 / numReadings; //nilai MOVAverage
    Tpile A2

    //Serial.print(averageDLIA_A1);
    Serial.print("\t");Serial.println(averageDLIA_A2);
    //Serial.print("\t");

    ///////////////////////////////////DLIA////////////////////////////////////

}

}

```

Program yang digunakan untuk membangkitkan sinyal kotak berfrekuensi 1kHz

```
int pinSignalKotak = 5; //Pin Out Sinyal Kotak
int wktawal = 0;
int varia = 0;
int period = 995;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pinSignalKotak, OUTPUT);
}

void loop() {

  ///////////////////////////////////SqWAVEGEN////////////////////////////////////

  if (((micros()-wktawal) % period) <= (period/2)){
    digitalWrite(pinSignalKotak, HIGH);
  }
  else if(((micros()-wktawal)%period)>=(period/2)){
    digitalWrite(pinSignalKotak, LOW);
  }

  ///////////////////////////////////SqWAVEGEN////////////////////////////////////

}
```

Program Simulasi Modulasi Frekuensi Sinyal dengan Matlab

```
clc
clear all
close all

Fs = 8000;           % samples per second
dt = 1/Fs;           % seconds per sample
StopTime = 0.25;     % seconds
t = (0:dt:StopTime-dt)';
fs = 2000;
l = 2000;
vm = 1;              %amplitudo sinyal pesan
vc = 1;              %amplitudo sinyal carrier
fM = 50;             %freq sinyal pesan
fc = 1000;           %freq sinyal carrier
m = 10;              %index modulasi

msg = vm*sin(2*pi*fM*t);
subplot(3,1,1);      %plotting message signal
plot(t,msg);
xlabel('Waktu');
ylabel('Amplitudo');
title('Sinyal Pesan');

carrier = vc*sin(2*pi*fc*t);
subplot(3,1,2);      %plotting carrier signal
plot(t,carrier);
xlabel('Waktu');
ylabel('Amplitudo');
title('Sinyal Pembawa');

y = vc*sin(2*pi*fc*t+m.*sin(2*pi*fM*t));
subplot(3,1,3);      %plotting FM (Frequency Modulated) signal
plot(t,y);
xlabel('Waktu');
ylabel('Amplitudo');
title('Sinyal FM');
```

Lampiran Program Simulasi Penguat *Lock-in* menggunakan Matlab

```
Fs = 1000; % samples per second
dt = 1/Fs; % seconds per sample
T = 1/fs;
l = 1e3;
t = (0:l-1)*dt;

s1 = square(2*pi*1*t);
s2 = square(2*pi*100*t);

m = (s1.*s2)+ sin(2*pi*0.5*t)+ sin(2*pi*2*t); %modulasi = s1.*s2
n = m.*s2; %sinyal noise
fc = 25; %frekuensi cutoff
wn = fc/(fs/2);
[b,a] = butter(4,wn,'low');
z = filtfilt(b,a,n); %sinyal setelah difilter
y = fft(z);

p2 = abs(y/(l/2));
p1 = p2(1:l/2+1);
p1(2:end-1)= 2*p1(2:end-1);
f = fs*(0:(l/2))/l;

%plot frekuensi hasil DLIA dalam format fft
figure(1);
plot(f,p1), axis([-10 100 0.0 5]);

%plot frekuensi hasil filterisasi
figure(2);
plot(z);

%plot frekuensi dengan campuran derau
figure(3);
plot(n);
```

Filter optik yang digunakan

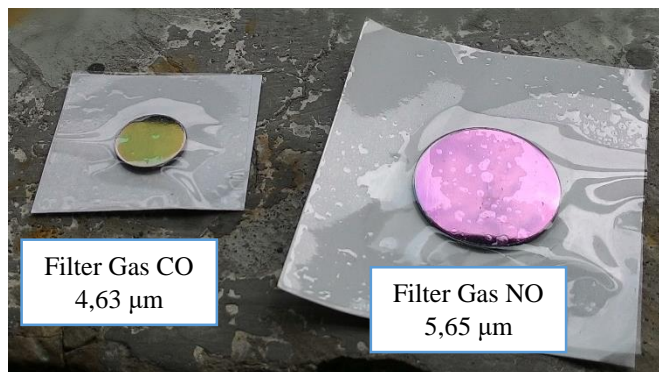
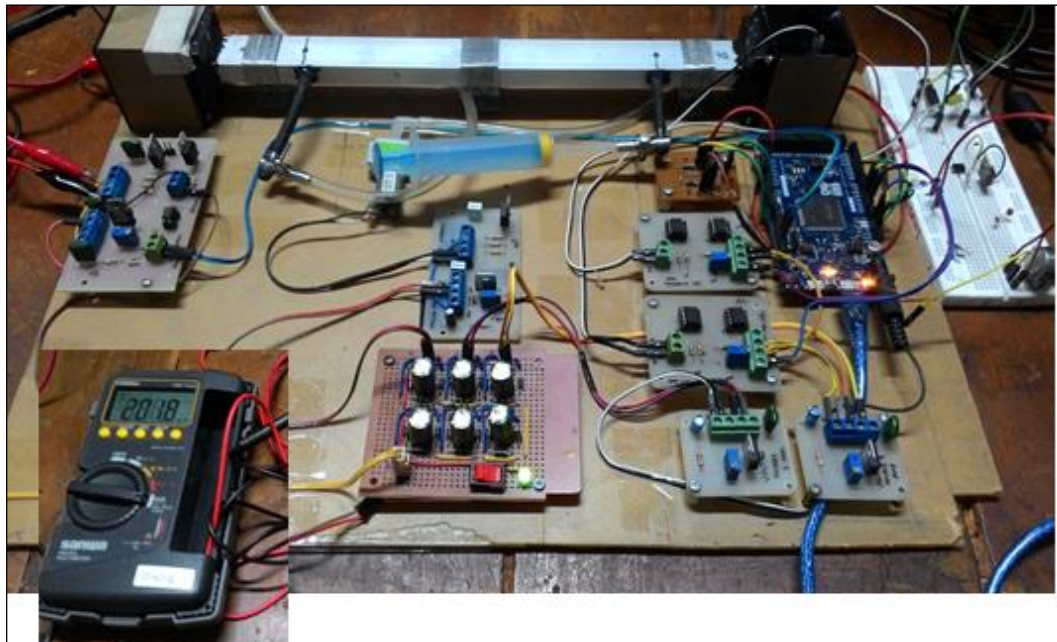


Foto saat pengujian berlangsung



BIOGRAFI PENULIS



Reza Diharja merupakan anak ke-2 dari bersaudara, pasangan Bapak Wa'un Haryo dan Ibu Yayah Rokayah. Lahir di Jakarta 9 Maret 1992 dan besar di Cibinong, Bogor. Mendapatkan gelar sarjana Fisika dari Universitas Indonesia pada tahun 2014. Selanjutnya masuk program pascasarjana Teknik Elektronika ITS pada semester genap 2017. Kontak email dan nomor hp: diharja@gmail.com / 085885899411